



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

**POROVNÁNÍ MIKRO-PRUTOVÝCH STRUKTUR PRO
ABSORPCI ENERGIE**

COMPARISON OF MICRO-LATTICE STRUCTURES FOR ENERGY ABSORPTION

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Tomáš Koban

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Ondřej Červínek

BRNO 2020

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav konstruování
Student: **Tomáš Koban**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Ondřej Červinek**
Akademický rok: 2019/20

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Porovnání mikro–prutových struktur pro absorpci energie

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Rozvoj kovových aditivních technologií umožnil výrobu mikro–prutových struktur s komplexní geometrií. Struktury mohou dosahovat vysokých hodnot mechanických vlastností při zachování nízkého objemového podílu materiálu. To je výhodné například v aplikacích uvažujících absorpci mechanické energie. Tento charakteristický atribut je do jisté míry dán typem použitého základového materiálu. Za účelem efektivního využití mikro–prutových struktur z různých materiálů je nutné nalézt metody jejich srovnání z hlediska absorpčních schopností.

Typ práce: výzkumná

Cíle bakalářské práce:

Hlavním cílem práce je porovnat schopnosti absorpce energie mikro–prutové struktury BCC vyrobené z hliníkové slitiny a nerezové oceli technologií selective laser melting.

Dílčí cíle bakalářské práce:

- rešeršní studie možností porovnání absorpce energie mikro–prutovými strukturami,
- návrh zkušebních těles s ohledem na možnosti výrobní technologie SLM,
- výroba testovacích těles a provedení tlakové zkoušky struktur,
- vyhodnocení a porovnání výsledků experimentu z hlediska absorpce energie.

Požadované výstupy: průvodní zpráva, fotografická dokumentace, digitální data.

Rozsah práce: cca 27 000 znaků (15 – 20 stran textu bez obrázků).

Časový plán, struktura práce a šablona průvodní zprávy jsou závazné:

<http://ustavkonstruovani.cz/texty/bakalarske–studium–ukonceni/>

Seznam doporučené literatury:

MINES, R. A. W., S. TSOPANOS, Y. SHEN, R. HASAN a S. T. MCKOWN. Drop weight impact behaviour of sandwich panels with metallic micro lattice cores. International Journal of Impact Engineering [online]. 2013, 60, 120–132. ISSN 0734743X. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijimpeng.2013.04.007

TANCOGNE-DEJEAN, T. a D. MOHR. Stiffness and specific energy absorption of additively-manufactured metallic BCC metamaterials composed of tapered beams. International Journal of Mechanical Sciences [online]. 2018, 141, 101–116. ISSN 00207403. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijmecsci.2018.03.027

RASHED, M. G., M. ASHRAF, R. A. W. MINES a P. J. HAZELL. Metallic microlattice materials: A current state of the art on manufacturing, mechanical properties and applications. Materials and Design [online]. 2016. ISSN 18734197. Dostupné z: doi:10.1016/j.matdes.2016.01.146

HARRIS, J. A., R. E. WINTER a G. J. MCSHANE. Impact response of additively manufactured metallic hybrid lattice materials. International Journal of Impact Engineering [online]. 2017, 104. ISSN 0734743X. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijimpeng.2017.02.007

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2019/20

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Additívne vyrobené kovové mikro-štruktúry majú značný potenciál v aplikáciách uvažujúcich absorpciu energie. Nedávny výskum v tejto oblasti viedol k lepšiemu porozumeniu deformačného správania mikro-štruktúr. Táto práca sa zaoberá porovnaním absorpčných vlastností mikro-prútových štruktúr vyrobených metódou selective laser melting v závislosti na ich topológii a základnom materiáli. Schopnosť absorbovať energiu bola skúmaná na troch geometrických konfiguráciách (BCC, BCCZ, GBCC) vyrobených z ocele 316L a hliníkovej zliatiny AlSi₁₀Mg. Na porovnanie materiálov bolo zvolené kritérium špecifickej absorpcie energie. Lepšia schopnosť absorpcie energie bola zaznamenaná pre mikro-prútové štruktúry vyrobené z nerezovej ocele. Z hľadiska topológie bolo najväčšie množstvo absorbovanej energie namerané u štruktúry BCCZ. Táto práca popisuje deformačný mechanizmus mikro-prútových štruktúr a ponúka komplexné vyhodnotenie absorpčných vlastností pre obidva materiály.

KLÚČOVÉ SLOVÁ

Selective laser melting, mikro-prútové štruktúry, AlSi₁₀Mg, 316L, absorpcia energie

ABSTRACT

Additively manufactured metal micro-structures have great potential in energy absorption applications. The recent research in this field led to a much better understanding of failure behaviour of these micro-structures. This thesis focuses on comparison of energy absorption ability of strut-based micro-lattice structures manufactured by selective laser melting depending on their topology and basic material. Energy absorption of three types of lattice structures (BCC, BCCZ, GBCC) made from stainless steel 316L and aluminium alloy AlSi₁₀Mg was examined. Specific energy absorption was used to compare the two materials. The results show that micro-lattice structures made from stainless steel outperform the aluminium ones in energy absorption ability. The highest amount of absorbed energy was measured for BCCZ structure. This thesis describes the failure mechanism of micro-lattice structures and offers a complex evaluation of energy absorption for both materials.

KEYWORDS

Selective laser melting, micro-lattice structures, AlSi₁₀Mg, 316L, energy absorption

BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA

KOBAN, Tomáš. *Porovnání mikro-prutových struktur pro absorpci energie*. Brno, 2018, 56 s. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování. Vedúci bakalárskej práce Ing. Ondřej Červinek.

POĎAKOVANIE

Na tomto mieste by som rád poďakoval Ing. Ondřejovi Červinkovi za cenné rady a poznatky, ktoré som získal pri tvorbe tejto práce pod jeho odborným a zodpovedným vedením. Ďalej by som sa chcel poďakovať mojej rodine, ktorá ma podporovala počas celej doby štúdia.

VYHLÁSENIE AUTORA O PÔVODNOSTI PRÁCE

Vyhlasujem, že bakalársku prácu som vypracoval samostatne, pod odborným vedením Ing. Ondřeja Červinka. Súčasne vyhlasujem, že všetky zdroje obrázkových a textových informácií, z ktorých som čerpal, sú riadne citované v zozname použitých zdrojov.

.....

Podpis autora

OBSAH

1	ÚVOD	12
2	PREHLAD SÚČASNÉHO STAVU POZNANIA	13
2.1	SLM materiály	13
2.2	Mriežkové štruktúry	15
2.2.1	Mikro-prútové štruktúry	16
2.3	Absorpcia energie	19
2.3.1	Popis deformačného mechanizmu	19
2.3.2	Faktory ovplyvňujúce absorpciu energie	23
3	ANALÝZA PROBLÉMU A CIEĽ PRÁCE	26
3.1	Analýza problému	26
3.2	Ciele práce	27
4	MATERIÁL A METÓDY	28
4.1	Použité materiály	28
4.2	Návrh a výroba testovacích vzoriek	29
4.3	Dynamická tlaková skúška	33
5	VÝSLEDKY	34
5.1	Výsledky pádového testu	36
5.2	Vyhodnotenie absorpcie energie	40
6	DISKUSIA	43
7	ZÁVER	46
8	ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV	47
9	ZOZNAM POUŽITÝCH SKRATIEK, SYMBOLOV A VELIČÍN	51
10	ZOZNAM OBRÁZKOV A GRAFOV	54
11	ZOZNAM TABULIEK	56

1 ÚVOD

Aditívna výroba, alebo tiež 3D, tlač je proces, ktorý sa využíva na výrobu trojrozmerných objektov z digitálnych dát. Základnou charakteristikou aditívnych výrobných technológií je postupné pridávanie materiálu iba v miestach určených geometriou súčasti. To nám umožňuje vytvárať zložité tvary, ktoré by nebolo možné vyrobiť klasickými metódami, resp. ich výroba by bola príliš nákladná. V súčasnosti sú aditívne výrobné technológie jednou z najrýchlejších sa rozvíjajúcich oblastí priemyslu.

Prvé aditívne technológie boli zamerané primárne na výrobu plastových prototypov. Postupným vývojom sa však okrem plastov začalo so spracovávaním kovových materiálov vo forme prášku. V oblasti aditívneho spracovania kovov dominujú laserové technológie. Jednou z takýchto technológií je aj metóda selective laser melting (SLM), ktorá na výrobu súčastí využíva tavenie kovového prášku laserom.

Metóda SLM umožňuje výrobu štruktúrovaných komponentov s komplikovanou geometriou, u ktorých môže byť dosiahnutá značná váhová úspora pri zachovaní vysokých hodnôt mechanických vlastností. Kombinácia nízkej hmotnosti súčastí, ktoré nie sú tvorené plným materiálom a dobrých mechanických vlastností kovových materiálov, predstavuje novú generáciu konštrukcií s uplatnením v automobilovom, leteckom či kozmickom priemysle. Príkladom takýchto konštrukcií sú práve mikro-prútové štruktúry.

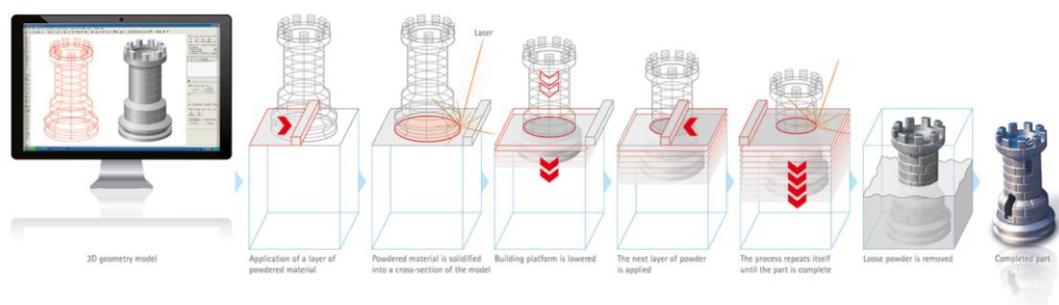
Mikro-prútové štruktúry spadajú do kategórie materiálov s bunečnou štruktúrou. Skladajú sa z periodicky sa opakujúcej elementárnej bunky prútového charakteru. Tieto štruktúry sú okrem váhovej úspory atraktívnou voľbou aj vďaka relatívne vysokej pevnosti a tuhosti. Ich schopnosť pohlcovať mechanickú energiu je možné využiť pri ochrane objektov pred rôznymi formami nárazu. Chráneným objektom môže byť čokoľvek, zariadenie, výrobok alebo samotný človek. Na správny návrh ochranných prostriedkov je nutné použiť teoretické a experimentálne namerané závislosti, vďaka ktorým dokážeme stanoviť deformačné správanie štruktúr pri zaťažení. Pri návrhu je potrebné zohľadniť faktory ako smer a rýchlosť zaťaženia, geometria a objemový podiel štruktúrovaného materiálu a v neposlednom rade charakter stavebného materiálu.

Mnoho štúdií bolo zameraných na skúmanie absorpcie energie mikro-prútových štruktúr v závislosti na ich geometrii, zaťažujúcich podmienkach alebo procesných parametroch metódy SLM. Väčšina štúdií však pracuje so štruktúrami vyrobenými iba z jedného materiálu. Schopnosť porovnávať vlastnosti štruktúr vyrobených z rôznych materiálov je zásadná. Umožňuje nám určiť materiál, ktorý sa pre danú aplikáciu najviac hodí z technického a ekonomického hľadiska.

2 PREHĽAD SÚČASNÉHO STAVU POZNANIA

Metóda SLM je druh aditívnej technológie, pri ktorej dochádza k úplnému roztaveniu častíc práškoveho materiálu a vzniku lokálnej roztavenej oblasti v malom okolí pôsobenia laseru. Rztavená oblasť je ovplyvňovaná množstvom fyzikálnych dejov, ako napríklad povrchové napätie kvapalnej fázy materiálu, rozdielna teplotná vodivosť kvapalnej a práškovej formy, tvorba oxidov pri tavení atď. [1]. Kvôli reaktivite niektorých kovov v práškovej forme a zároveň zabráneniu rýchlej oxidácii musí tlač prebiehať pod ochrannou atmosférou. V praxi sa používa argónová alebo dusíková atmosféra. Pri technológii SLM sa prednostne používajú lasery s optickými vláknami, ktoré poskytujú dostatočný výkon na úplné natavenie kovového prášku.

Rovnako, ako ostatné kovové aditívne metódy, je aj metóda SLM založená na nanášaní prášku vrstvu po vrstve (obr. 2-1). Proces začína nanosením úvodnej vrstvy na základnú platformu. Následne je prášok natavený laserom podľa geometrie špecifikovanej CAD modelom. Po produkcii jednej vrstvy platforma poklesne o konkrétnu vzdialenosť a nasleduje nanášanie ďalšej vrstvy. Tento proces sa opakuje, až pokiaľ súčasť nie je kompletne vyhotovená.



obr. 2-1 Princíp metódy SLM [2]

2.1 SLM materiály

Väčšina výskumu týkajúca sa technológie SLM sa zameriava na zliatiny na báze železa a hliníku. Tieto materiály sú používané najmä z dôvodu širokej škály aplikácií ako aj dobrému spracovaniu a výrobe surového materiálu. Okrem železa a hliníku sa pri technológii SLM stretávame aj s titánovými, niklovými či horčíkovými zliatinami. Nevýhodou týchto materiálov je však pomerne vysoká cena. Táto práca je zameraná na výskum oceľových a hliníkových štruktúr, a preto budú nasledujúce state zamerané práve na tieto materiály.

Pri metóde SLM má zásadný vplyv na kvalitu vyrobených súčastí nastavenie procesných parametrov. Väčšina výskumných publikácií, ktoré pracujú so zliatinami na báze železa, sa zameriava na nerezovú oceľ 316L. Ahmadi a kol. [2] skúmali vplyv výkonu lasera a skenovacej rýchlosti na mechanické vlastnosti plochých tyčí vyrobených z ocele 316L určených pre ťahovú skúšku. V ich experimente sa ukázalo, že nízky výkon lasera alebo vysoké skenovacie rýchlosti spôsobujú neúplné natavenie práškoveho materiálu, čo má za následok vysokú porozitu komponentu a celkové zníženie mechanických vlastností. Tolosa a kol. [3] skúmali vplyv stavebnej orientácie na výsledné vlastnosti vzoriek z ocele 316L. Došli k záveru, že jednotlivé vzorky voči sebe vykazujú anizotropné chovanie, a teda vlastnosti jednoznačne závisia na stavebnej stratégii. Rovnako sa im ako jedným z prvých výskumných tímov podarilo metódou SLM vyrobiť oceľové komponenty s relatívnou hustotou až 99,9%.

Ďalšie druhy ocelí boli skúmané v súvislosti s technológiou SLM. Childs a kol. [4] reportovali výsledky experimentov pri použití rôznych druhov ocelí ako rýchlorezná oceľ M2, nástrojová oceľ H13 a nerezová oceľ 314S. Aj pri týchto oceľových materiáloch sa ukázalo, že kombinácia vysokého výkonu lasera a nízkej skenovacej rýchlosti zaručuje stabilnú a plynulú taviacu dráhu, čo má za následok nižšiu porozitu vyrobeného komponentu.

Výskumy potvrdili, že oceľové komponenty vyrobené metódou SLM vykazujú vyššiu pevnosť, ale nižšiu tvárnosť oproti komponentom vyrobeným klasickými metódami [5]. Táto zmena vlastností je spôsobená fyzikálnou podstatou metódy SLM, kde dochádza k nataveniu a následne k rýchlemu stuhnutiu materiálu. Výsledkom je jemnejšia a kompaktnejšia mikro-štruktúra, ktorá kladie väčší odpor voči deformácii.

Hliníkové zliatiny sa vyznačujú nízkou hmotnosťou, dobrou tepelnou vodivosťou, odolnosťou voči korózii a vysokou odrazivosťou. Vysoká tepelná vodivosť a odrazivosť vyžaduje použitie vysokého výkonu lasera (v rozmedzí 100-500 W v závislosti na type laseru), aby sa vykompenzovala rapídna disipácia tepelnej energie [6]. Výsledné vlastnosti súčastí vyrábaných z hliníkových materiálov sú oproti oceliam viac závislé na morfológii a chemickom zložení kovového prášku. Hliníkové prášky sa vyznačujú zlou „tekutosťou“. Je to schopnosť vzájomného pohybu častíc prášku. Tekutosť prášku je pri metóde SLM zásadná, pretože od nej závisí jednotnosť nanášanej vrstvy, a teda aj množstvo výrobných defektov. Geometrický tvar častíc a vlhkosť prášku má na tekutosť zásadný vplyv. Prášky s malými, guľovitými časticami a vysokým obsahom kremíku zaručujú viac homogénnu textúru s menším počtom nedokonalostí [7].

Al-Si zliatiny patria v súvislosti s SLM k najrozšírenejším materiálom na báze hliníku. Okrem vlastností typických pre hliníkové materiály, ako nízka hmotnosť a dobrá tepelná vodivosť, Al-Si zliatiny vykazujú výbornú zvariteľnosť a odolnosť voči korózii [8]. Vďaka tejto kombinácii vlastností sú Al-Si zliatiny uplatniteľné v leteckom a automobilovom priemysle. Konkrétne zliatiny $\text{AlSi}_{10}\text{Mg}$ a AlSi_{12} sú v súčasnosti najpoužívanějšími Al-Si materiálmi. Pridaním malého množstva horčíka (0,45-0,6 hm%) do hliníkovej zliatiny dochádza k precipitácii Mg_2Si , čo má za následok spevnenie materiálu bez výrazného ovplyvnenia ostatných mechanických vlastností.

Bolo dokázané, že hliníkové komponenty vyrobené metódou SLM majú zrovnateľné, ba dokonca lepšie vlastnosti ako komponenty vyrobené klasickým odlievaním [8]. Príčinou tohto javu je jemná mikro-štruktúra a vhodné rozloženie kremíkovej fázy, ktoré vzniká pri rýchlom tuhnutí nataveného prášku.

2.2 Mriežkové štruktúry

Prírodné materiály s bunkovou štruktúrou ako drevo, korok alebo kosti boli známe po stáročia. Ich neobvyklé tvary boli následne napodobňované v moderných odvetviach priemyslu v snahe zredukovať hmotnosť súčastí a umiestniť materiál iba na nevyhnutné miesta [9].

Bunkové štruktúry s pravidelne sa opakujúcou elementárnou geometriou sa vyznačujú unikátnymi pevnosťami, tepelnými a akustickými vlastnosťami. Sú charakteristické veľmi nízkou tepelnou vodivosťou a výbornou schopnosťou pohlcovať zvukové vibrácie, čo umožňuje ich použitie ako tepelné a akustické izolanty [10]. Ich deformačné chovanie sa značne líši od súčastí vyrobených z plného materiálu, čo umožňuje bunkovým štruktúram aj pri nízkej hmotnosti pohlcovať významné množstvo mechanickej energie.

Bunkové štruktúry môžeme vo všeobecnosti rozdeliť na štruktúry s definovanou geometriou a štruktúry s nedefinovanou geometriou. Nevýhodou štruktúr s nedefinovanou geometriou, ku ktorým patria napríklad penové materiály, je fakt, že majú nekonzistentné mechanické vlastnosti a nemôžeme dostatočne dobre predikovať správanie štruktúry po zaťažení. Naopak, u štruktúr s definovanou geometriou, sme presným návrhom geometrie schopní dosiahnuť vlastnosti požadované pre konkrétnu aplikáciu. Avšak kvôli komplexnej geometrii je výroba takýchto štruktúr značne náročná a vyžaduje si použitie nekonvenčných výrobných technológií.

Základným typom bunkových štruktúr s presne navrhnutou geometriou sú tzv. mriežkové štruktúry. Mriežkové štruktúry sú topologicky usporiadané trojdimenzionálne štruktúry, ktoré sa skladajú z pravidelne sa opakujúcej elementárnej bunky [11]. V anglickej terminológii sú označované ako *lattice structures*. Elementárna bunka sa vo všeobecnosti skladá z prútov a uzlov, ale existujú aj mriežkové štruktúry, ktoré nemajú prútový charakter. K takýmto štruktúram patria napríklad štruktúry s minimálnym povrchom (TPMS) [12] alebo schránkové štruktúry [9].

Hlavnými faktormi, ktoré ovplyvňujú mechanické vlastnosti štruktúry, sú podľa Ashbyho [13] topológia elementárnej bunky, relatívna hustota a materiál, z ktorého je štruktúra vyrobená. V prípade výroby štruktúr metódou SLM je potrebné okrem spomenutých troch faktorov zohľadniť aj procesné parametre pri výrobe, ktoré majú zásadný vplyv na výsledné vlastnosti štruktúry.

Topológia je kľúčovým faktorom, určujúcim spôsob prenášania zaťaženia vo vnútri štruktúry. S topológiou bunky súvisí aj rozdelenie štruktúr na *closed-cell* a *open-cell*. Pre funkčné aplikácie, ako napríklad prietok tekutiny, sú viac vyhovujúce *open-cell* štruktúry. Naopak, pre štrukturálne aplikácie, ako napríklad nosné konštrukcie, sú *closed-cell* štruktúry efektívnejšie, vďaka lepším pevnostným vlastnostiam [1].

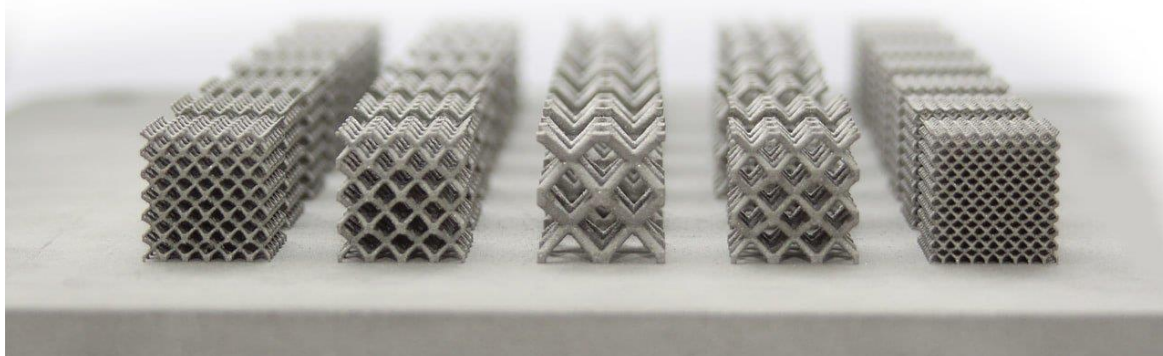
Relatívna hustota vyjadruje pomerné množstvo materiálu v bunke. Čím je jej hodnota vyššia, tým je v bunke obsiahnutý väčší objem materiálu, a teda je bunka tuhšia. Presná definícia relatívnej hustoty ρ' je stanovená ako pomer hustoty bunky ρ^* a hustoty plného materiálu ρ_s , z ktorého je bunka vyrobená

$$\rho' = \frac{\rho^*}{\rho_s} \quad 2-1$$

Porozita bunky je potom definovaná ako $1 - \rho'$ [10].

2.2.1 Mikro-prútové štruktúry

Mikro-prútovými štruktúrami označujeme mriežkové štruktúry, ktorých geometria je založená na malých nosníkoch - prútoch, ktoré sú spojené v spoločných bodoch - uzloch (obr. 2-2). Podľa Ashbyho [13] je rozmer základnej bunky hlavným rozdielom medzi mikro-prútovými štruktúrami a klasickými prútovými konštrukciami, ako sú mosty alebo žeriavy. Veľkosť elementárnej bunky mikro-prútových štruktúr sa pohybuje rádovo v milimetroch, prípadne mikrometroch. Štruktúru uvažujeme ako prútovú konštrukciu charakterizovanú počtom prútov a uzlov, ale zároveň aj ako nový materiál so svojimi špecifickými vlastnosťami, ktoré môžeme priamo porovnávať s vlastnosťami materiálu, z ktorého je štruktúra vyrobená. Tieto typy mriežkových štruktúr sú volené najmä z dôvodu svojej jednoduchšej geometrie, ale aj napriek tomu bola vyvinutá snaha o ich topologickú optimalizáciu [14] [15].



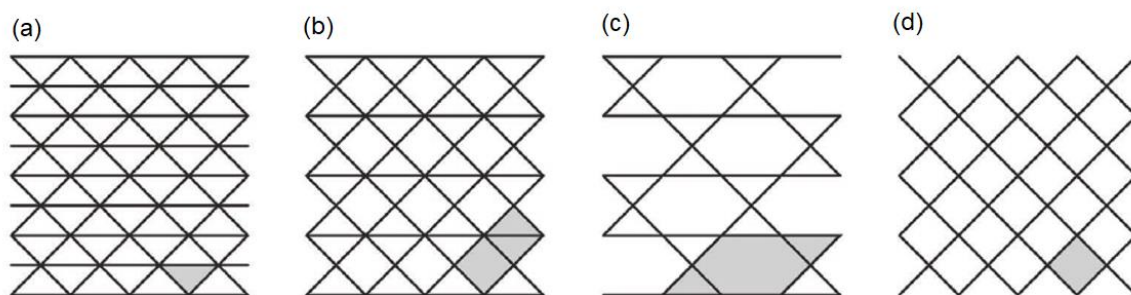
obr. 2-2 Mikro-prútové štruktúry vyrobené metódou SLM na zariadení Renishaw AM250 [16]

Základnou geometrickou charakteristikou mikro-prútových štruktúr je pomer prútov a uzlov obsiahnutých v štruktúre. To môžeme vyjadriť tzv. Maxwellovým číslom M [17]

$$M = s - 3n + 6 \quad (2-2)$$

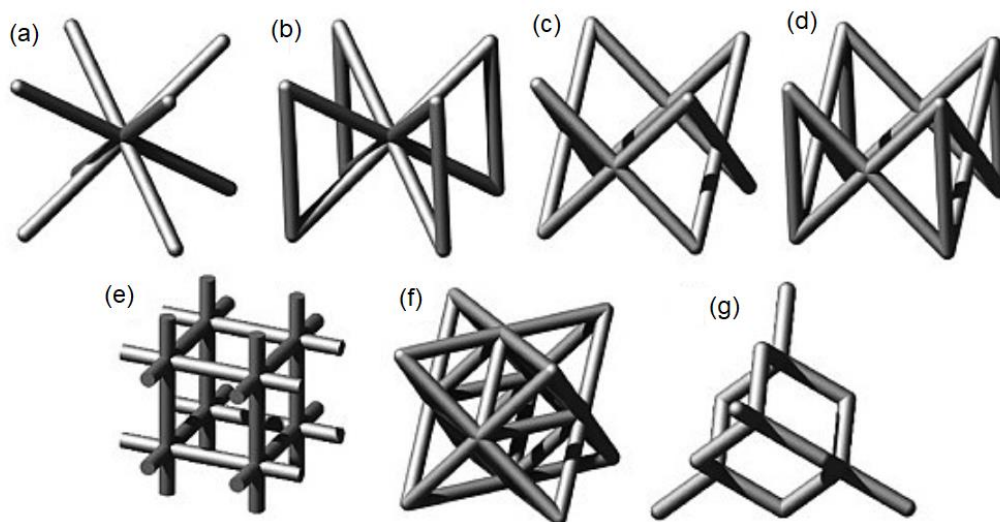
kde s je počet prútov a n uzlov. Ak $M < 0$, štruktúra má príliš málo prútov na to, aby vyvážala externé zaťaženie bez vzniku ohybových momentov v uzlových bodoch. Takúto štruktúru označujeme ako *bending-dominated*. Tieto štruktúry sa vyznačujú vyššou poddajnosťou a plynulým priebehom deformácie. Do tejto skupiny radíme väčšinu mriežkových štruktúr a vo všeobecnosti platí, že open-cell štruktúra je zároveň aj bending-dominated. Ak $M \geq 0$, potom štruktúra obsahuje dostatočné množstvo prútov, že externé zaťaženie môže byť vykompenzované napätím a deformáciou iba v jednotlivých prútoch a nie v uzloch. Tento typ štruktúry označujeme ako *stretching-dominated*. V ideálnej stretching-dominated štruktúre pôsobí napätie iba v jednom smere. Tieto štruktúry vykazujú výrazne vyššiu tuhosť, a preto sú používané najmä na štruktúrne aplikácie.

Na základe konektivity sme schopní jednoducho určiť charakter štruktúry. Konektivita vyjadruje počet prútov spojených v jednom uzle [18]. Ak $Z=6$ v 2D resp. $Z=12$ v 3D, potom štruktúru označujeme ako „dokonale tuhú“ a štruktúra bude zaručene stretching-dominated. V 2D priestore platí, že jedine štruktúra s usporiadaním prútov do trojuholníka je zaručene stretching-dominated (obr. 2-3a). Avšak aj topológie s nižšou konektivitou môžu teoreticky patriť do tejto kategórie, označujeme ich ako „periodicky tuhé“ štruktúry (obr. 2-3b,c). Ak štruktúra nemá dostatočne hustú topológiu, tak spadá do kategórie bending-dominated (obr. 2-3d). Hoci je rozdelenie štruktúr na bending a stretching-dominated na základe topológie platné v mnohých prípadoch, nezahŕňa ostatné faktory ako smer a podmienky zaťaženia alebo tvar jednotlivých uzlov. Preto niekedy toto rozdelenie nemožno považovať za korektné.



obr. 2-3 Topológie 2D štruktúr podľa konektivity: (a) $Z=6$ plne hustá štruktúra zostrojená z trojuholníkovej topológie; (b,c) periodický husté štruktúry $Z=5$ (b), $Z=4$ (c); (d) $Z=4$ štruktúra s nedostatočne hustou topológiou, spadá do kategórie bending-dominated [18]

Mikro-prútová štruktúra, ktorá bola doposiaľ najviac skúmaná, je štruktúra s priestorovo centrovanou kubickou elementárnou bunkou (BCC), prípadne jej variácie (obr. 2-4a,b). Geometria BCC štruktúry je založená na kryštalografickej molekulárnej mriežke a na základe vyššie uvedených charakteristík ju radíme medzi bending-dominated štruktúry. Predchádzajúce štúdie sa zameriavali najmä na jej mechanické vlastnosti a deformačné mechanizmy. Ushijima a kol. [19], Gümrük a Mines [20] stanovili teoretické modely BCC štruktúry, popisujúce počiatočnú tuhosť a mechanizmy plastickej deformácie pri rozličných zaťažujúcich podmienkach. Následne boli vypracované štúdie [21] [22], ktoré porovnávajú skutočné správanie BCC štruktúry a jej variácii s teoretickými modelmi pri rôznych druhoch zaťaženia, ako napríklad ťah, tlak, strih, trojbodový ohyb alebo kombinované namáhanie.



obr. 2-4 Základné typy mikro-prútových štruktúr: (a) BCC; (b) BCCZ; (c) FCC; (d) FCCZ; (e) Kubická; (f) Okto-prútová; (g) Diamant [23]

Ushijima a kol. [19] stanovili, že hlavnou príčinou kolapsu BCC štruktúry je vznik plastického „klbu“ v blízkosti uzlov. Prúty pri zaťažení rotujú okolo týchto klbov až nakoniec dôjde k strižnému porušeniu prútu. Z toho vyplýva, že najnebezpečnejšie miesto z hľadiska porušenia sa nachádza v blízkosti uzlových bodov. Tento mechanizmus porušenia vzniká kvôli malým rádiom v miestach spoja uzlov a prútov. Rádiusy predstavujú koncentratory napätia, ktoré celú štruktúru výrazne oslabujú. Ich zväčšením je možné doceliť vyššiu odolnosť štruktúry voči porušeniu. Tento fakt viedol k vytvoreniu upravených BCC štruktúr, ktoré sa snažia tomuto javu predísť. K takýmto štruktúram patria už spomenuté TPMS štruktúry alebo prútové štruktúry so stupňujúcim sa prierezom prútu. Bai a kol. [24] dokázali, že pri zachovaní relatívnej hustoty môže BCC štruktúra s priemerom prútu rastúcim od stredu prútu smerom k uzlu dosiahnuť zlepšenie tuhosti až o 38,2 % oproti klasickej BCC štruktúre.

2.3 Absorpcia energie

Schopnosť materiálu absorbovať energiu sa využíva najmä v súvislosti s ochranou objektov voči nárazu. Snahou je premeniť čo najväčšie množstvo kinetickej energie na inú formu energie, najčastejšie plastickú energiu, teplo či trenie, pričom je nutné udržať maximum sily pôsobiacej na chránený objekt pod kritickou hodnotou. A keďže musí byť ochranný prvok prenášaný spolu s chráneným objektom, je snaha o váhovú úsporu očividná. A práve mriežkové štruktúry splňujú kombináciu týchto požiadaviek. Smer nárazu v reálnej situácii nemusí byť predvídateľný, a preto sú izotropné vlastnosti ochranných prvkov rovnako zásadné [10]. Tento faktor môže byť nedostatkom mriežkových štruktúr, pretože väčšina geometrií vykazuje anizotropné chovanie.

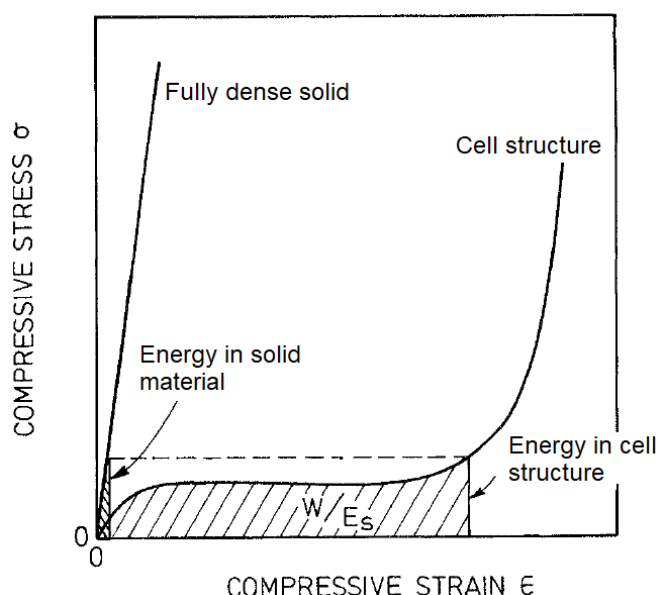
2.3.1 Popis deformačného mechanizmu

Pri rovnakom množstve pohltenej energie bude maximálna hodnota napätia v bunkovej štruktúre vždy nižšia, ako v plnom materiáli (obr. 2-5). Energia je absorbovaná ako sa steny bunky ohýbajú, kolabujú alebo triešia, charakter deformačného mechanizmu značne závisí od základného materiálu a ovplyvňuje celkový tvar krivky napätia (obr. 2-6).

Schopnosť štruktúry absorbovať energiu udáva množstvo energie pohltenej na jednotku objemu, ktoré môžeme vyjadriť ako obsah plochy pod krivkou napätia až po konkrétnu hodnotu deformácie ε_1 [10]

$$W = \int_0^{\varepsilon_1} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon \quad (2-3)$$

kde σ a ε sú hodnoty napätia a deformácie.



obr. 2-5 Závislosť napätia na pomernej deformácii pre plný a štruktúrovaný materiál ukazujúca množstvo absorbovanej energie pri rovnakej hodnote maximálneho napätia [10]

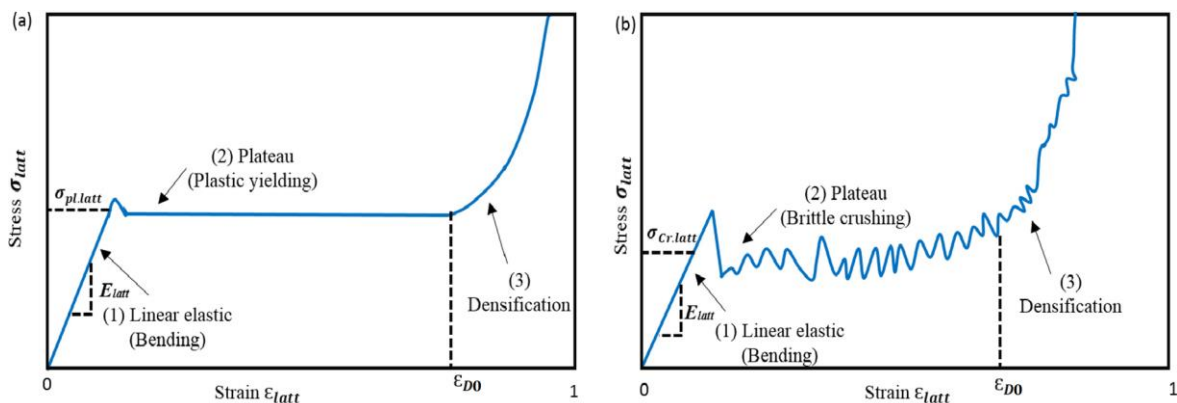
Absorbovaná energia môže byť ďalej normalizovaná hustotou bunky ρ^* . Takto upravená hodnota sa označuje ako špecifická absorpcia energie [25]

$$\bar{W} = \frac{W}{\rho' \cdot \rho_s} \quad (2-4)$$

kde ρ' je relatívna hustota a ρ_s je hustota plného materiálu.

Iba veľmi malé množstvo energie je pohltené v lineárnej oblasti deformácie. Ako ukazuje obr. 2-5, je to až oblasť dlhého konštantného napätia označovaného ako *plateau stress*, v ktorom dochádza k výraznému pohlteniu energie. Oblasť plateau stress predstavuje deformačný kolaps štruktúry. V závislosti od materiálu a geometrie môže elementárna bunka vykazovať v oblasti plateau stress buď spevňujúcu alebo zmäkčujúcu charakteristiku. Za zmienku určite stojí, že makroskopická štruktúra tvorená z elementárnych buniek vykazujúcich spevňujúcu charakteristiku bude mať rovnako spevňujúci charakter. Avšak štruktúra tvorená z buniek so zmäkčujúcou charakteristikou bude mať v oblasti plateau stress približne konštantný priebeh [26].

So zväčšujúcim sa zaťažením dochádza k zhutňovaniu materiálu, steny buniek sa voči sebe približujú, až nakoniec dôjde k ich vzájomnému kontaktu. Počiatok tohto zhutňovania a zároveň koniec oblasti konštantného napätia je charakterizovaný limitnou hodnotou deformácie ε_{d0} označovanej ako *denzification initiation strain* [26]. Po prekročení tohto bodu dochádza k prudkému zvýšeniu napätosti pri minimálnej deformácii, štruktúra už teda nie je schopná efektívne absorbovať viac energie.



obr. 2-6 Typická závislosť napätia na deformácii pre bunkové štruktúry: (a) húževnatý materiál; (b) krehký materiál [27]

V literatúre je často používaný ďalší termín, *denzification strain* [10]. Mnohokrát má tento termín rovnaký význam ako denzification initiation strain, avšak jedná sa o dva rozličné pojmy. Denzification initiation strain predstavuje deformáciu, pri ktorej začína zhusťovanie materiálu a z hľadiska určovania energie má väčší význam, pretože nám jednoznačne rozdeľuje oblasť konštantného napätia a oblasť denzifikačnú [28]. Pojem denzification strain predstavuje deformáciu, pri ktorej dochádza ku kontaktu stien bunky [10]. Inak povedané je to hodnota deformácie, ktorá reprezentuje úplnú denzifikáciu. Túto deformáciu označujeme ε_d a vo všeobecnosti ju môžeme vyjadriť ako funkciu relatívnej hustoty ρ'

$$\varepsilon_d = f\left(\frac{\rho^*}{\rho_s}\right) \quad (2-5)$$

Mohlo by sa zdať, že hodnota deformácie ε_d bude jednoducho rovná porozite bunky $(1 - \rho^*/\rho_s)$, pretože je to deformácia, pri ktorej dôjde k vyplneniu vnútorných dutín. Experimentálne merania však ukázali, že úplná denzifikácia nastáva už pri menších deformáciách. Napríklad v prípade elastických a plastických pien môže byť hodnota ε_d vyjadrená pomocou lineárnej funkcie

$$\varepsilon_d = 1 - \alpha \cdot \left(\frac{\rho^*}{\rho_s}\right) \quad (2-6)$$

kde α je v rozmedzí 1,4 až 2,0 [29].

Ako však bolo uvedené, hodnota ε_{d0} je z hľadiska absorpcie energie reprezentatívnejšia, a preto iba táto hodnota bude uvažovaná v ďalších častiach. Existuje viacero spôsobov ako určiť hodnotu ε_{d0} [26]:

1. Metóda - Počiatok denzifikácie je definovaný ako deformácia v priesečníku dotýčnic vytvorených ku krivke plateau stress a krivke denzifikácie.
2. Metóda - Počiatok denzifikácie je definovaný ako deformácia v poslednom lokálnom minime pred prudkým nárastom napätia.

3. Metóda - Počiatok denzifikácie je definovaný ako bod, v ktorom je sklon dotýčnice rovnaký ako sklon v elastickej oblasti.

4. Metóda - Počiatok denzifikácie je definovaný ako deformácia, pri ktorej je schopnosť absorpcie energie najvyššia.

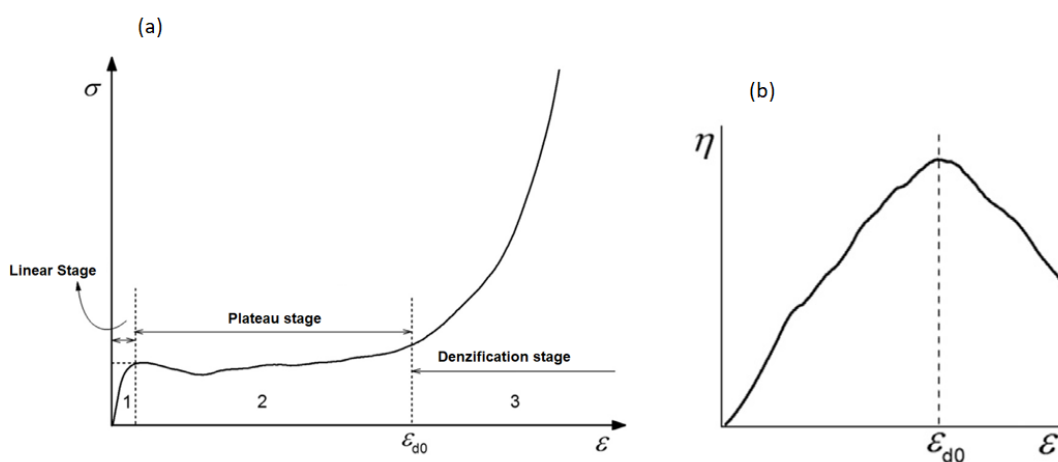
Najpoužívanejšou metódou je práve posledná spomenutá metóda, založená na sledovaní účinnosti absorpcie energie [12] [25]. Schopnosť materiálu absorbovať energiu má vždy svoje maximum pri určitej hodnote napätia, pretože po prekročení tejto hodnoty, bude prírastok absorbovanej energie nižší ako ekvivalentný nárast napätia [30]. Na určenie optimálnej absorpcie energie zavádzame tzv. parameter účinnosti, ktorý je definovaný

$$\eta(\varepsilon) = \frac{1}{\sigma(\varepsilon)} \int_0^\varepsilon \sigma(\varepsilon) d\varepsilon \quad (2-7)$$

Hodnota deformácie na počiatku denzifikácie ε_{d0} je potom určená v bode, kde účinnosť absorpcie energie na krivke účinnosť-deformácia dosahuje maximum, teda platí

$$\left. \frac{d\eta(\varepsilon)}{d\varepsilon} \right|_{\varepsilon=\varepsilon_{d0}} = 0 \quad (2-8)$$

Typická krivka účinnosti absorpcie energie ku korešpondujúcej krivke napätia je zobrazená na obr. 2-7b. Na základe známej hodnoty ε_{d0} môžeme potom určiť množstvo energie, ktoré je štruktúra schopná pohltiť. Výhodou tejto metódy je, že môže byť aplikovaná aj na prípady, s rozličnými rýchlosťami deformácie.

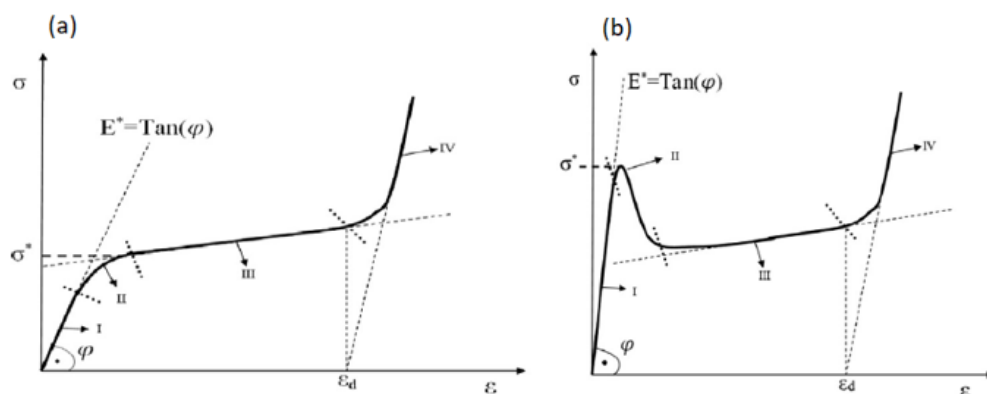


obr. 2-7 (a) závislosť napätia na deformácii pri jednoosej kompresii; (b) závislosť parametra účinnosti na deformácii [28]

2.3.2 Faktory ovplyvňujúce absorpciu energie

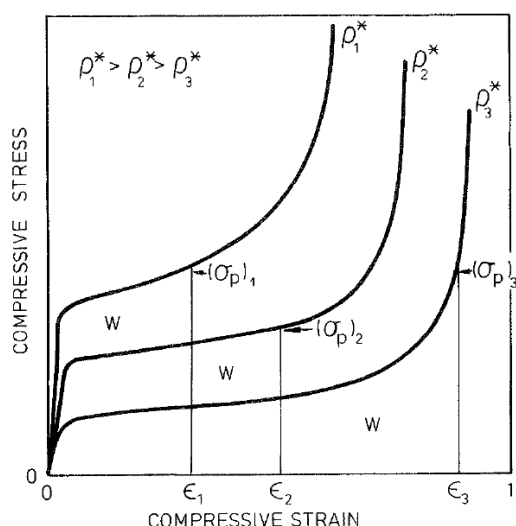
Základné faktory, ktoré ovplyvňujú mechanické vlastnosti bunečnej štruktúry, a teda aj schopnosť absorbovať energiu, sú topológia, relatívna hustota a materiál. Výrazné rozdiely v deformačnom chovaní však môže spôsobiť aj zmena rýchlosti deformácie.

Ako bolo uvedené v časti 2.2.1 mikro-prútové štruktúry môžeme v závislosti na usporiadaní prútov rozdeliť na bending-dominated a stretching-dominated. Stretching-dominated štruktúry sa oproti bending-dominated štruktúram s rovnakou relatívnou hustotou vyznačujú vyššími hodnotami modulu pružnosti a medze klzu. Avšak u týchto štruktúr sú jednotlivé prúty namáhané primárne na ťah/tlak. Po prekročení medze klzu dochádza k strate vzperovej stability alebo ku krehkému lomu niektorých prútov, čo má za následok výrazný pokles napätia v oblasti plateau stress (obr. 2-8b). Charakter deformačného mechanizmu (vzper, lom) závisí najmä od základného materiálu. U bending-dominated štruktúr po prekročení medze klzu dochádza k plynulej plastickej deformácii, čo zaručuje konštantnú hodnotu v oblasti plateau stress. Jedná sa primárne o deformáciu ohybom [13]. Topológia elementárnej bunky teda priamo ovplyvňuje deformačný mechanizmus štruktúry, od ktorého závisí tvar krivky napätia a aj schopnosť absorbovať energiu.



obr. 2-8 Charakteristické krivky napätia pre štruktúry: (a) bending-dominated; (b) stretching-dominated

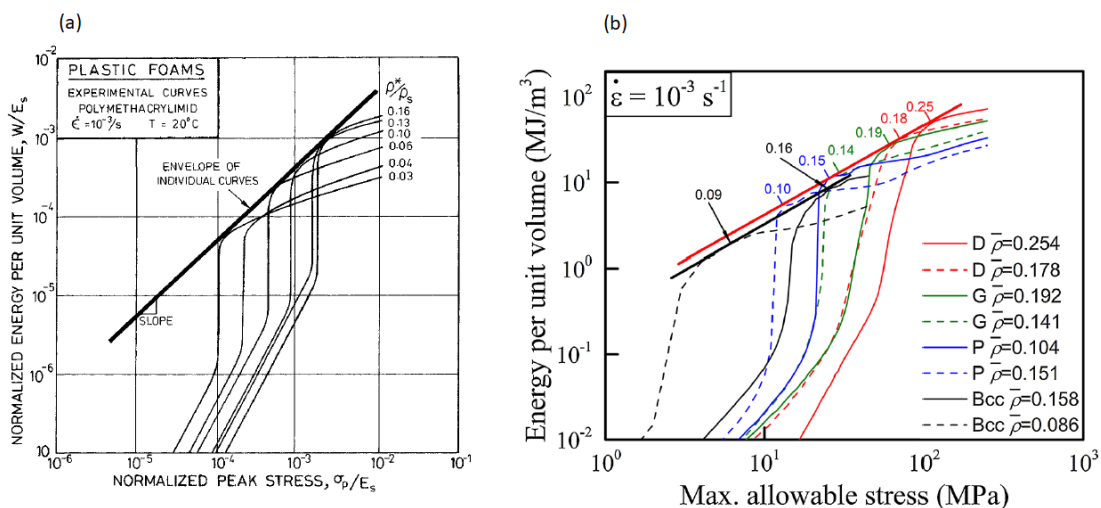
Ďalším faktorom, ktorý je treba zohľadniť pri návrhu mikro-prútových štruktúr je relatívna hustota. Pre každú geometrickú konfiguráciu vyrobenú z určitého materiálu existuje optimálna hodnota relatívnej hustoty. Obr. 2-9 ukazuje, že keď je relatívna hustota príliš nízka, tak dochádza k prudkému nárastu napätia skôr ako je absorbované požadované množstvo energie, to znamená až po začiatku denzifikácie. Naopak, ak je hustota príliš vysoká, tak oblasť plateau stress nastáva pri veľmi vysokej hodnote napätia, čo je rovnako nežiadúce, z dôvodu krehkého porušenia materiálu. Môžeme teda usúdiť, že štruktúra s ideálnou hustotou bude mať oblasť plateau stress tesne pod kritickou hodnotou napätia, ktoré by mohlo štruktúru poškodiť, a zároveň plocha pod krivkou napätia, ktorá predstavuje množstvo absorbovanej energie, bude siahäť po hodnotu deformácie ε_{d0} , kedy denzifikácia začína [10].



obr. 2-9 Maximálne hodnoty napätia vzniknuté v štruktúrach s rôznou relatívnou hustotou pri absorbovaní rovnakého množstva energie W sú označené $(\sigma_p)_1$, $(\sigma_p)_2$ a $(\sigma_p)_3$ [10]

Atraktívnu voľbu, ako optimalizovať hodnotu relatívnej hustoty, predstavujú diagramy absorpcie energie. Ak budeme uvažovať vzorky s rovnakou geometrickou konfiguráciou vyrobené z rovnakého materiálu s rôznymi hodnotami relatívnej hustoty, ktoré sú podrobené tlakovej skúške s rovnakou rýchlosťou deformácie $\dot{\epsilon}_1$ pri zhodnej teplote T_1 , dostaneme skupinu kriviek napätia. Následne určíme obsah plochy pod jednotlivými krivkami až po stanovenú limitnú hodnotu napätia σ_p , ktorá predstavuje absorbovanú energiu na jednotku objemu, W . Diagram absorpcie energie získame vykreslením množstva pohltenej energie W v závislosti na napätí σ_p , obidve veličiny sú normalizované Youngovým modulom základného materiálu, E_s (obr. 2-10a). Najlepšia štruktúra pri daných zaťažovacích podmienkach bude tá, ktorá dokáže pohltiť najväčšie množstvo energie po maximálne dovolené napätie σ_p . Z obr. 2-10 môžeme usúdiť, že ku každej hodnote kritického napätia, σ_p , existuje ideálna relatívna hustota. Je to práve hodnota, ktorá odpovedá „zlomu“ v krivke absorpčného diagramu, pretože v tomto bode je hodnota pohltenej energie danou štruktúrou vyššia ako pre hociktorú inú krivku [10].

Spojnice týchto zlomov predstavuje vzťah medzi W a σ_p pre optimálnu hustotu štruktúry pri zaťažení rýchlosťou $\dot{\epsilon}_1$ a teplote T_1 . Vďaka znalosti tejto závislosti je možné pre danú geometrickú konfiguráciu a materiál určiť hustotu štruktúry, ktorá bude pre konkrétnu aplikáciu najvhodnejšia. Čím väčšie množstvo vzoriek bude použitých na zostrojenie diagramu, tým získame presnejšiu optimálnu závislosť. Pri zostrojovaní diagramov absorpcie energie však treba brať do úvahy aj vyrobiteľnosť vzoriek a možnosti ich testovania. Tým, že potrebujeme získať štruktúry s rozdielnymi hodnotami relatívnej hustoty, budú priamo ovplyvnené rozmery štruktúr, čo môže predstavovať problém pre niektoré výrobné metódy. To platí aj pre metódu SLM.



obr. 2-10 (a) diagram absorpcie energie zostrojený pre plastickú polymetakrylimidovú penu s relatívnou hustotou v intervale ρ^*/ρ_s (0,03;0,16) [10]; (b) diagram absorpcie energie pre BCC a TPMS štruktúry vyrobené z ocele 316L metódou SLM [12]; zaťažovacie podmienky sú zhodné pre obidve merania: $\dot{\epsilon} = 10^{-3} \text{ s}^{-1}$; $T=20^\circ\text{C}$

Z hľadiska rýchlosti deformácie rozlišujeme tri rýchlostné kategórie: nízka, stredná a vysoká [10]. Rýchlosť deformácie priamo súvisí s rýchlosťou zaťaženia. Nízke zaťažovacie rýchlosti sú v rozmedzí $10^{-9} - 10^{-3} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, to odpovedá rýchlosti kvázi-statickej skúšky. Väčšina výskumov zameraných na analýzu mechanických vlastností bunkových štruktúr využíva práve kvázi-statické zaťaženie [12], [14], [27]. Avšak ochranné prostriedky sú zväčša dimenzovaná na vyššie zaťažovacie rýchlosti, a teda pri skúmaní schopnosti štruktúry absorbovať energiu z nárazu sú dáta z kvázistatických testov neadekvátne. Preto sú na tento účel vhodnejšie skúšky so strednými hodnotami zaťažovacích rýchlostí, ako je skúška na padostroji alebo servo-hydraulickom stroji, kedy sa rýchlosti deformácie pohybujú rádovo v jednotkách až desiatkách $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, čo lepšie simuluje podmienky pri skutočnom náraze [31]. Vysokorýchlostné skúšky sa vykonávajú napríklad pri balistických testoch, kedy rýchlosti zaťaženia môžu dosahovať hodnôt až $10^4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

3 ANALÝZA PROBLÉMU A CIEĽ PRÁCE

3.1 Analýza problému

Prvé štúdie skúmajúce absorpčné vlastnosti bunečných štruktúr boli zamerané primárne na výskum penových materiálov. Nejednalo sa teda o štruktúry s pravidelnou geometriou vyrobené pomocou aditívnych technológií. Gibson a Ashby [10] skúmali vlastnosti elastických a plastických pien a hexagonálnych štruktúr vyrobených z polymérnych materiálov. Stanovili, že schopnosť bunečnej štruktúry pohlcovať mechanickú energiu spočíva v jej deformačnom chovaní a určili základné metódy na výpočet množstva absorbovanej energie. Li a kol. [26] nadviazali na ich prácu a skúmali absorpčné vlastnosti kovových pien. Zamerali sa na metódy určenia deformácie, pri ktorej účinnosť absorpcie energie dosahuje svoje maximum, vďaka čomu je možné určiť najväčšie množstvo energie pohltenej štruktúrou.

Intenzívny výskum pórovitých materiálov s nepravidelnou geometriou [10] [30] [29] viedol k záveru, že zlepšenie mechanických vlastností môže byť dosiahnuté pomocou štruktúr s periodicky navrhnutou mikro-prúťovou geometriou. Tieto štruktúry môžu dosahovať vyšších hodnôt mechanických vlastností pri zachovaní nízkeho objemového podielu materiálu.

Výroba takýchto štruktúr je však značne náročná. V prípade metódy SLM je vplyv procesných parametrov zásadný na mechanické vlastnosti vyrobených komponentov. Jednotlivé materiály vyžadujú odlišné nastavenie procesných parametrov. Yap a kol. [5] preto vytvorili prehľad materiálov vhodných pre metódu SLM, nastavenie ich procesných parametrov a možnosti aplikácii v praxi. Na detailný popis mechanických vlastností oceľových materiálov v závislosti na procesných parametroch bolo zameraných viacero štúdií [2] [32]. Qiu a kol. [33] skúmali mechanické vlastnosti mikro-prúťových štruktúr vyrobených z hliníkovej zliatiny $AlSi_{10}Mg$ pri použití rozličných výkonov lasera a skenovacích rýchlostí. Ich merania ukázali, že so zvyšujúcim sa výkonom dochádza k zväčšeniu priemeru jednotlivých prúťov a nárastu celkovej tuhosti vzoriek.

Najčastejšie skúmanou geometrickou konfiguráciou mikro-prúťových štruktúr je priestorovo stredená kubická mriežka BCC. Gümrük a Mines [20] porovnávali teoretické a skutočné správanie BCC vzoriek vyrobených z ocele 316L pri kvázi-statickom tlakovom zaťažení. Vzniknuté rozdiely boli spôsobené nepresnou definíciou rozmerov, kvality povrchu alebo mikro-štruktúry materiálu v teoretickom modeli. Podobné porovnanie vykonal Li a kol. [34] pre štruktúry BCCZ vyrobené z hliníkovej zliatiny $AlSi_{10}Mg$. Rozdiel teoretickej hodnoty tuhosti a modulu pružnosti oproti experimentálne nameraným hodnotám bol menší ako 17 %.

Tancogne-Dejaean a Mohr [15] podrobili ordinárnu BCC štruktúru a BCC štruktúru s premenou hrúbkou prútov kvázi-statickej a dynamickej tlakovej skúške. Upravením hrúbky prútu boli schopní dosiahnuť zvýšenie modulu pružnosti až o 70 % a rovnako zvýšenie množstva absorbovanej energie až na hodnotu 50 % v závislosti od relatívnej hustoty jednotlivých vzoriek.

Zhang a kol. [12] porovnávali TPMS štruktúry vyrobené z ocele 316L oproti BCC štruktúre z hľadiska absorpcie energie. Na vyhodnotenie výsledkov použili metódy stanovené Gibsonom a Ashbyom [10] pre polymérne peny a potvrdili ich korektnosť aj v prípade kovových mikro-prútových štruktúr vyrobených metódou SLM. TPMS štruktúry výrazne prekonal klasickú BCC konfiguráciu v otázke tuhosti aj schopnosti absorbovať energiu. Harris a kol. [25] skúmali mechanické vlastnosti a schopnosť absorpcie energie hybridných mikro-štruktúr vyrobených z ocele 316L pri dynamickom zaťažení. Stanovili, že najrelevantnejšie zhodnotenie absorpčných vlastností kovových mikro-štruktúr poskytuje porovnanie hodnôt špecifickej absorpcie energie (rov. 2-4).

Žiadna zo štúdií zameraných na mechanické vlastnosti mikro-prútových štruktúr vyrobených metódou SLM však neposkytuje priame porovnanie štruktúr z dvoch rozličných materiálov z hľadiska absorpcie energie.

3.2 Ciele práce

Hlavným cieľom tejto práce je porovnať schopnosť absorpcie energie mikro-prútovej štruktúry BCC a jej modifikácii vyrobených z hliníkovej zliatiny AlSi10Mg a nerezovej ocele 316L metódou SLM.

Dielčie ciele:

- Rešeršná štúdia možností porovnania absorpcie energie
- Návrh skúšobných telies s ohľadom na možnosti výroby technológiou SLM
- Výroba testovacích telies a vykonanie dynamickej tlakovej skúšky
- Vyhodnotenie a porovnanie výsledkov z hľadiska absorpcie energie

4 MATERIÁL A METÓDY

4.1 Použité materiály

Prvým výrobným materiálom je chrom-niklová austenitická oceľ s označením 316L podľa AISI. Oceľ 316L má širokú škálu využitia, prevažne sa jedná o chemický, potravinársky priemysel alebo medicínske aplikácie. Charakteristickými vlastnosťami sú pevnosť, tvrdosť, kujnosť a výborná odolnosť voči korózii. Komponenty vyrobené z nerezovej ocele vykazujú homogénnu textúru s takmer nulovou porozitou a mechanickými charakteristikami podobnými materiálovým špecifikáciám [2].

Druhým materiálom je hliníková zliatina AlSi10Mg. Zliatina AlSi₁₀Mg sa vyznačuje nízkou hmotnosťou, dobrou tepelnou vodivosťou a odolnosťou voči korózii. Je použiteľná pre tenkostenné súčasti a súčasti s komplexnou geometriou. Schopnosť dosiahnuť vysokých hodnôt pevnosti pri zachovaní dynamickej únosnosti umožňuje použitie tejto zliatiny na vysoko namáhané súčasti.

Obidva práškové materiály boli vyrábané technológiou plynovej atomizácie. Na zabezpečenie správneho nanášania vrstiev prášku boli materiály pred výrobou dôkladne vysušené a preosiate na vibračnom triediacom zariadení. Chemické zloženie a veľkosť častíc práškových materiálov sú uvedené v tab. 4-1.

316L		AlSi ₁₀ Mg	
Prvok	(%)	Prvok	(%)
Fe	Bal.	Al	Bal.
Cr	17,5	Si	10
Ni	11,3	Mg	0,40
Mo	2,2	O	0,13
Mn	1,8	Fe	0,11
Si	0,8	N	<0,02
C	0,03	Mn,Ni,Pb,Sn, Ti,Zn	<0,01
Veľkosť častíc: 10-50 μm		Veľkosť častíc: 20-63 μm	

tab. 4-1 Chemické zloženie a veľkosť častíc práškových materiálov použitých na výrobu testovacích vzoriek uvedené výrobcom (TLS Technik)

4.2 Návrh a výroba testovacích vzoriek

Pre experiment boli navrhnuté tri typy mikro-prútových štruktúr, ktorých geometria je založená na priestorovo centrovanej kubickej mriežke. Prvým typom je nemodifikovaná BCC mriežka, ktorá predstavuje najjednoduchší typ mikro-prútovej štruktúry. Ako už bolo uvedené, je to štruktúra, ktorá bola doposiaľ najviac skúmaná [20]. Táto štruktúra nevykazuje najlepšie hodnoty mechanických vlastností v porovnaní s inými geometriami pri zachovaní rovnakej relatívnej hustoty, ale jednoduchosť návrhu a výroby ju pre testovacie účely značne uprednostňuje. Druhým typom je BCC mriežka vystužená zvislými prútmi, bežne označovaná ako BCCZ [34].

Posledná geometrická konfigurácia bola navrhnutá výskumným tímom z univerzity Chongqing [24], označovaná ako GBCC. Strednice prútov majú rovnaké usporiadanie ako nemodifikovaná BCC mriežka, avšak dochádza k zmene prierezu po dĺžke prútu. Cieľom tejto geometrickej úpravy je zredukovať napätie vznikajúce v priesečníku prútov, kde ostrý uhol medzi prútmi predstavuje koncentrátor napätia (obr. 4-1a). Plynulú zmenu priemeru prútu zabezpečuje kruhový oblúk s polomerom R (obr. 4-1b), ktorý je vyjadrený ako:

$$R = \frac{l^2 + 4(R_2 - R_1)^2}{8(R_2 - R_1)} \quad 4-1$$

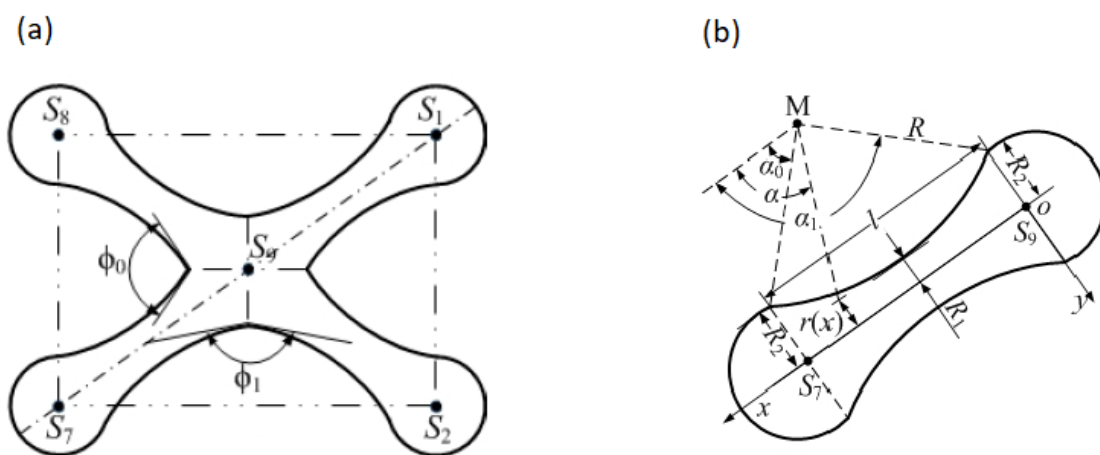
kde R_1 je najmenší priemer prútu, R_2 je najväčší priemer prútu, $l = \sqrt{3}L/2$ a L predstavuje dĺžku hrany elementárnej bunky. Ak zvolíme počiatok súradnicového systému v bode O_{xy} (Obr. 5-1b), tak stred tohto oblúku, označený ako bod M , sa nachádza na súradniciach $(l/2; -R - R_1)$ a pre každý bod nachádzajúci sa na oblúku platí vzťah:

$$\left(x - \frac{l}{2}\right) + [y + (R + R_1)]^2 = R^2 \quad 4-2$$

Polomer priečného prierezu prútu r je potom vyjadrený v závislosti na súradnici x ako:

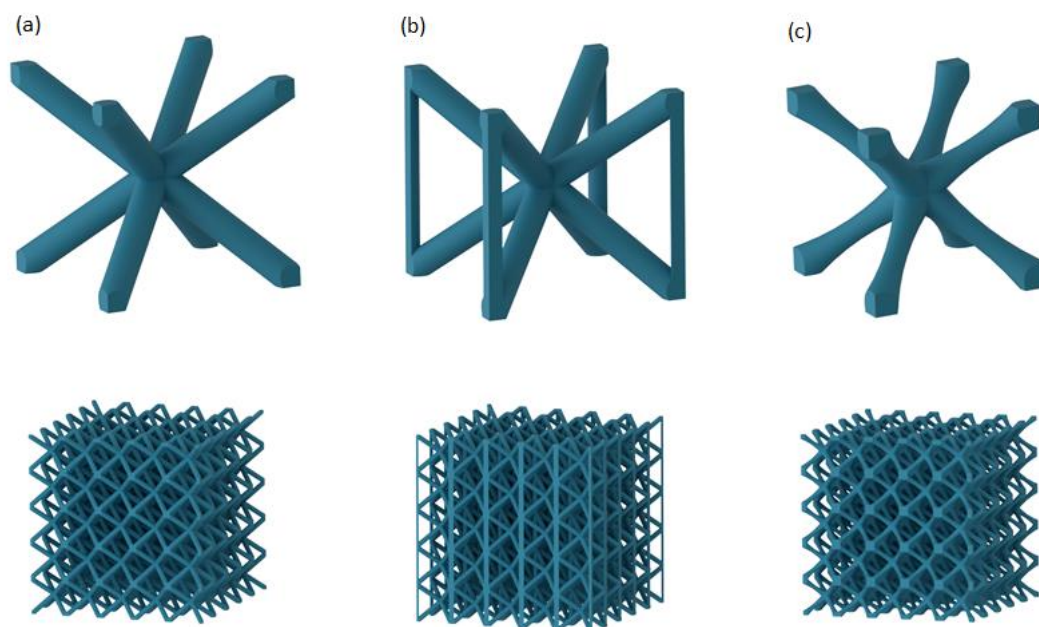
$$r(x) = (R + R_1) - \sqrt{R^2 - \left(x - \frac{l}{2}\right)^2} \quad 4-3$$

Veľkosť uhlu α medzi vektorom spájajúcim bod M a ľubovoľný bod na oblúku s polomerom R a osou x je v rozmedzí $\alpha \in \langle \alpha_0; \pi - \alpha_0 \rangle$, kde $\alpha_0 = \arcsin[(R + R_1 - R_2)/R]$.



obr. 4-1 (a) Prierez GBCC elementárnej bunky diagonálnou rovinou; (b) Geometria prútu GBCC bunky [24]

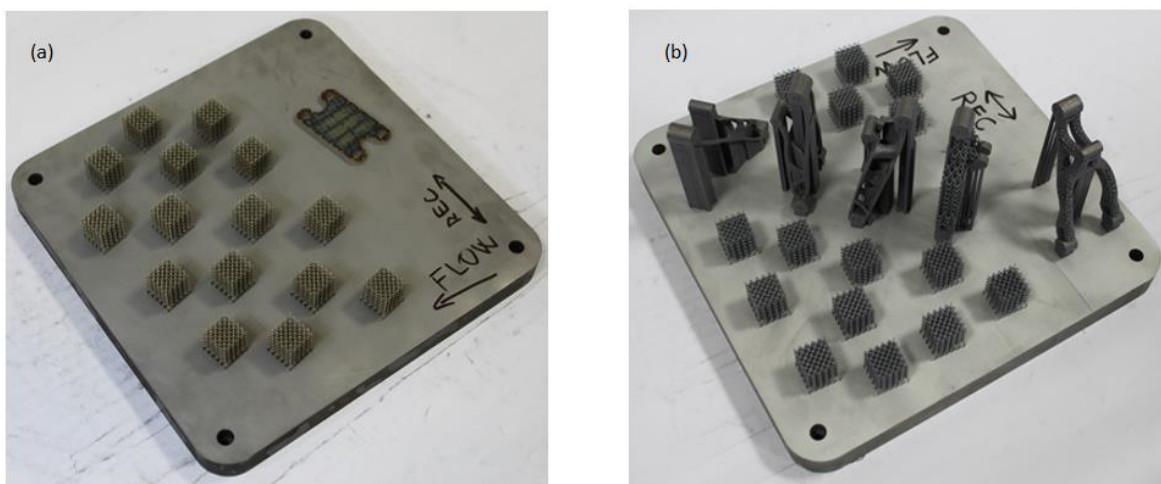
Elementárna bunka všetkých troch typov štruktúr je kocka s hranou o veľkosti 4 mm. Vo vzorkách určených na výrobu a testovanie sú elementárne bunky v usporiadaní 5x5x5 (obr. 4-2). Rozmery boli volené z dôvodu efektívnej výroby a možností pádového testovacieho zariadenia. Na základe predošlých experimentov [35] bol pre BCC štruktúru zvolený priemer prútov $d_{BCC}=0,6$ mm. Pre zvyšné dve štruktúry bol priemer prútov upravený tak, aby bola dosiahnutá rovnaká hodnota relatívnej hustoty, $d_{BCCZ}=0,562$ mm, $d_{1GBCC}=0,494$ mm a $d_{2GBCC}=1$ mm. Teoretická hodnota relatívnej hustoty určenej z CAD modelu je $\rho'_{CAD} = 0,106$. Pri zachovaní relatívnej hustoty pre všetky vzorky bude možné lepšie vyhodnotiť vplyvu materiálu a topológie na absorpciu energiu, pretože eliminujeme faktor, ktorý zásadne ovplyvňuje vlastnosti štruktúr.



obr. 4-2 CAD modely elementárnych buniek (hore) a celých štruktúr (dole); (a) BCC; (b) BCCZ; (c) GBCC

CAD modely štruktúr vytvorené v programe AutoDesk Inventor boli ďalej spracované pomocou softvéru Materialise Magics, ktorý slúži k príprave dát pre tlač na SLM stroji. Do uzlov na spodnej stene štruktúr boli umiestnené podpory o výške 5 mm a priemerom rovným priemeru uzlu. Tieto podpory slúžia na odstránenie štruktúr od výrobné platformy.

Z každej geometrickej konfigurácie bolo vyrobených 5 testovacích vzoriek, t.j. 15 vzoriek z ocele 316L a 15 vzoriek z hliníkovej zliatiny $AlSi_{10}Mg$. Všetky vzorky boli vyrábané na stroji SLM 280HL (SLM Solutions GmbH, Lübeck, Germany) vybavenom optickým vláknovým laserom o výkone 400 W (YLR-laser) s Gaussovým tvarom rozdelenia energie a bodovým priemerom 82 μm . Aby sa zaistili rovnaké výrobné podmienky, tak všetky vzorky z jedného materiálu boli vyrobené v jedinej sérii (obr. 4-3). Nastavenie procesných parametrov pre vzorky vyrábané z ocele je odlišné ako pre vzorky z hliníkovej zliatiny. Základné hodnoty procesných parametrov sú uvedené v tab. 4-2.



obr. 4-3 Rozmiestnenie štruktúr na výrobné platforme; (a) 316L; (b) $AlSi_{10}Mg$; (Flow – smer prúdenia ochranné atmosféry; Rec – pohyb zásobníku s práškom, recouter)

Procesné parametre	316L	$AlSi_{10}Mg$
Výkon laseru - okraje	100 W	300 W
Výkon laseru - výplň	275 W	350 W
Scan. rýchlosť - okraje	300 mm·s ⁻¹	600 mm·s ⁻¹
Scan. rýchlosť - výplň	700 mm·s ⁻¹	1150 mm·s ⁻¹
Hrúbka vrstvy	50 μm	50 μm
Predohrev platformy	100°C	150°C
Typ atmosféry	N ₂	N ₂
Max. množstvo O ₂	0,2%	0,2%

tab. 4-2 Procesné parametre pre vzorky vyrobené z materiálu 316L a $AlSi_{10}Mg$

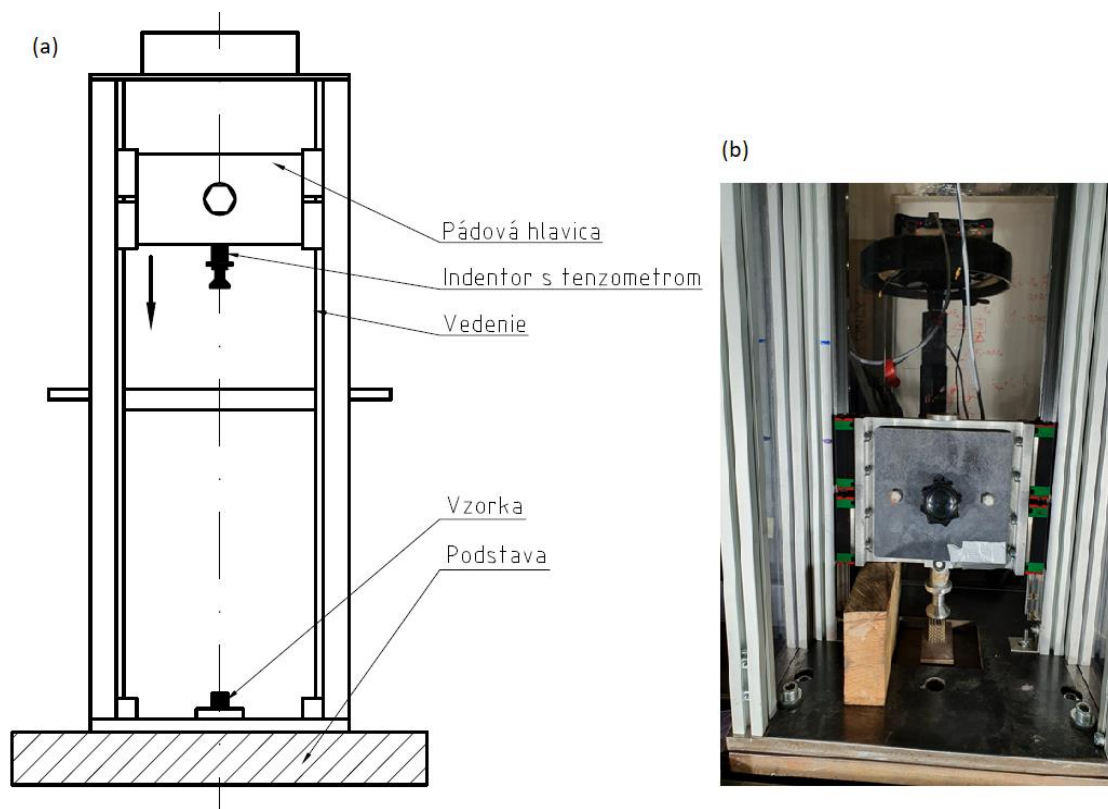
Vzorky boli následne manuálne odstránené z výrobných platforiem. Na odstránenie zvyškov podpôr zo spodnej steny štruktúr bola použitá metalografická brúska. Po obrúsení boli vzorky vysušené, očistené a presne zvážené. Dôraz bol kladený na meranie rozmeru štruktúr v smere stavby. Tento rozmer je zásadný pri pádovom testovaní vzoriek. Prehľad rozmerov jednotlivých štruktúr je uvedený v tab. 4-3. Celkový objem štruktúr bol vypočítaný zo skutočných rozmerov vzoriek. Ako hodnoty hustoty materiálov boli použité hodnoty uvádzané v materiálových listoch (SLM Solutions). Skutočná relatívna hustota vzoriek bola určená na základe hmotností jednotlivých vzoriek. Pre detailnejšie zhodnotenie kvality výroby bola jedna vzorka z každej série nafotená pomocou optického mikroskopu Olympus SZX7 (Olympus, Tokyo, Japonsko).

Štruktúra		316L				AlSi ₁₀ Mg			
		<i>h</i> (mm)	<i>a</i> (mm)	<i>b</i> (mm)	<i>m</i> (g)	<i>h</i> (mm)	<i>a</i> (mm)	<i>b</i> (mm)	<i>m</i> (g)
BCC	1	20,31	20,1	20,1	7,176	20,49	20,1	20,1	2,612
	2	20,30	20,1	20,1	7,212	20,51	20,1	20,7	2,611
	3	20,35	20,05	20,1	7,177	20,40	20,1	20,1	2,560
	4	20,32	20,1	20,1	7,226	20,48	20,3	20,5	2,618
	5	20,27	20,05	20,1	7,342	20,41	20,3	20,2	2,630
\bar{x}		20,31	20,08	20,1	7,227	20,46	20,18	20,32	2,606
BCCZ	1	20,23	20,05	20,1	7,053	20,33	20,2	20,1	2,682
	2	20,28	20,1	20,2	7,165	20,37	20,2	20,2	2,698
	3	20,26	20,1	20,05	7,188	20,41	20,2	20,1	2,668
	4	20,31	20,05	20,05	7,270	20,35	20,2	20,1	2,677
	5	20,34	20,1	20,1	7,222	20,38	20,1	20,2	2,690
\bar{x}		20,28	20,08	20,1	7,180	20,37	20,18	20,14	2,683
GBCC	1	20,29	20,0	20,3	7,247	20,30	20,1	20,2	2,700
	2	20,40	20,1	20,4	7,264	20,40	20,1	20,0	2,764
	3	20,37	20,0	20,2	7,317	20,42	20,1	20,0	2,796
	4	20,48	20,1	20,2	7,388	20,37	20,1	20,1	2,740
	5	20,44	20,1	20,35	7,356	20,40	20,0	20,1	2,782
\bar{x}		20,40	20,06	20,29	7,314	20,38	20,08	20,08	2,756

tab. 4-3 Prehľad základných rozmerov a hmotností kubických štruktúr (*h* - rozmer v smere stavby)

4.3 Dynamická tlaková skúška

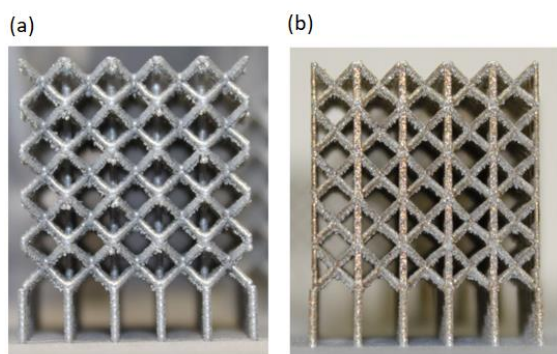
Vyrobené vzorky boli testované na pádovom zariadení navrhnutom na Fakulte strojního inžénrství VUT v Brne (obr. 4-4a). Zaťažujúce podmienky boli pre všetky vzorky rovnaké, dopad hlavice o hmotnosti $m=8,45$ kg z výšky $h=1$ m. Rovnako boli všetky vzorky zaťažované v smere ich stavby. Snímač sily (XY31-3/120) umiestnený na hlavici meria reakčnú silu počas deformácie vzorky. Signál zo snímaču je nahrávaný pomocou systému Quantum X MX410B (HBM GmbH) s frekvenciou 96 kHz. Na vykonanie pádového testu je potrebná aj vysokorýchlostná kamera Phantom V710, ktorá sníma polohu značky umiestnenej na hlavici s frekvenciou 57 kHz. Vysokorýchlostná kamera umožňuje priradiť ku každému časovému okamihu príslušnú hodnotu deformácie. Záznam z kamery aj tenzometra boli spoločne vyhodnotené pomocou programu Matlab. Hlavnými výstupmi merania sú: závislosť reakčnej sily na čase a deformácii, závislosť rýchlosti hlavice na čase a deformácii, dĺžka deformácie a maximálna deformácia vzorky. Rýchlosti pádovej hlavice sa pohybujú v intervale $2-3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.



obr. 4-4 (a) Schéma pádového zariadenia; (b) Fotografia pádového testu oceľovej vzorky BCC

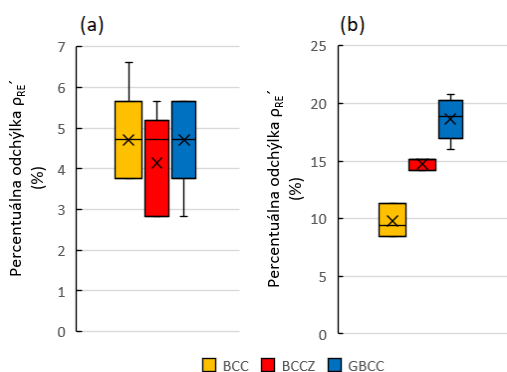
5 VÝSLEDKY

Pri výrobe štruktúr BCCZ z hliníkovej zliatiny boli odstránené zvislé prúty nachádzajúce sa na okrajoch štruktúry (obr. 5-1). Z obr. 4-2b je zrejmé, že plocha prierezu krajných zvislých prútov je 4krát menšia ako plocha zvislých prútov nachádzajúcich sa vo vnútri štruktúry. Zmenšenie rozmeru krajných prútov predstavuje problém pre hliníkovú zliatinu z hľadiska vyrobiteľnosti metódou SLM. Prúty s tak malou hrúbkou by sa mohli pri výrobnom procese zrútiť. Pri príprave dát v programe Magics systém automaticky rozpoznal príliš malé rozmery krajných prútov a v týchto miestach nebolo vygenerované šrafovanie lasera. Odstránenie týchto prútov predstavuje pokles relatívnej hustoty približne o 4,5%. Pokles hmotnosti nastal u oboch materiálov aj pri štruktúrach GBCC, kde pri odstraňovaní vzoriek z platformy došlo k ulomeniu niektorých krajných prútov. Dôvodom bolo použitie podpôr s väčším priemerom.



obr. 5-1 Porovnanie štruktúr BCCZ: (a) AlSi₁₀Mg; (b) 316L

V tab. 5-1 sú uvedené hodnoty relatívnej hustoty zistené z hmotnosti vyrobených vzoriek. Relatívna hustota každej vzorky presiahla teoretickú hodnotu stanovenú z CAD modelu ($\rho'_{CAD} = 0,106$). Rozsah percentuálnej odchýlky skutočnej relatívnej hustoty ρ'_{RE} od teoretickej hodnoty ($\rho'_{CAD} = 100\%$) pre jednotlivé geometrické konfigurácie je zobrazený na obr. 5-2. Najväčší rozdiel medzi skutočnou a teoretickou hodnotou relatívnej hustoty bol 20,8 % u vzorky GBCC3 z hliníkovej zliatiny.

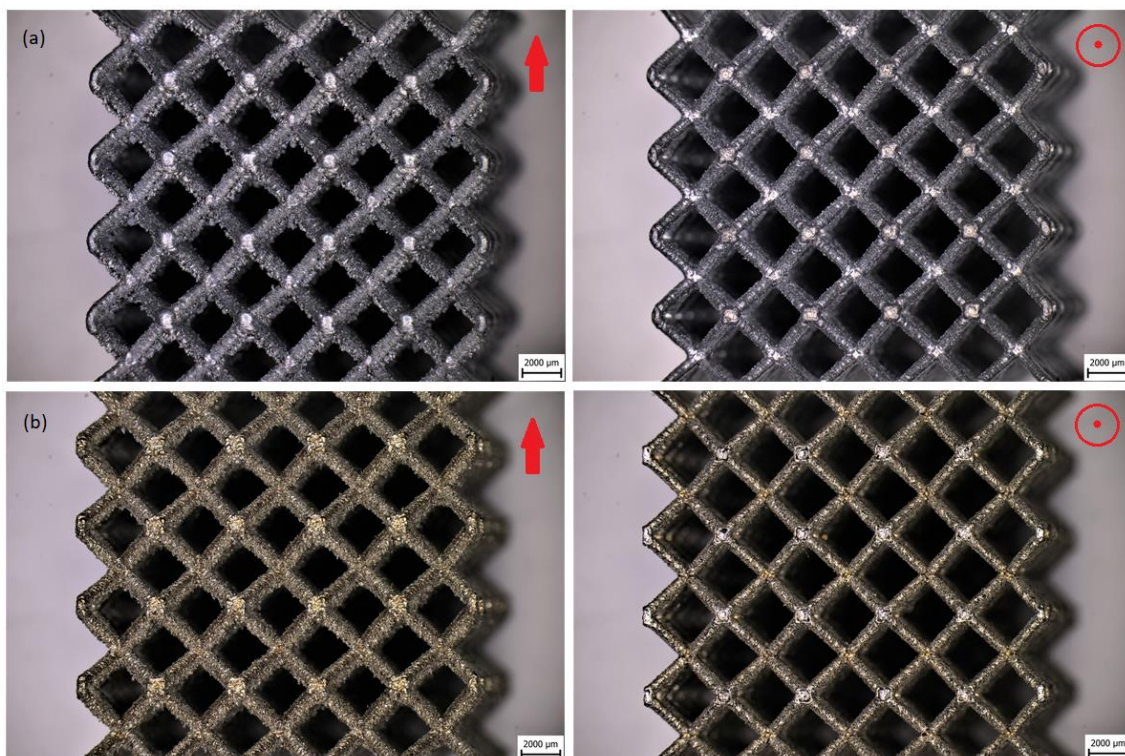


obr. 5-2 Rozsah percentuálnej odchýlky ρ'_{RE} pre jednotlivé geometrické konfigurácie: (a) 316L; (b) AlSi₁₀Mg

Štruktúra	316L		AlSi ₁₀ Mg		
		$\rho'_{RE} (-)$	Priemer	$\rho'_{RE} (-)$	Priemer
BCC	1	0,110	0,111	0,118	0,116
	2	0,111		0,115	
	3	0,110		0,116	
	4	0,111		0,115	
	5	0,113		0,118	
BCCZ	1	0,109	0,111	0,122	0,126
	2	0,109		0,122	
	3	0,111		0,121	
	4	0,112		0,121	
	5	0,111		0,122	
GBCC	1	0,111	0,110	0,123	0,121
	2	0,109		0,126	
	3	0,112		0,128	
	4	0,112		0,125	
	5	0,111		0,127	

tab. 5-1 Hodnoty relatívnej hustoty zistené z hmotnosti pre všetky testované vzorky (Hustoty plného materiálu: $\rho_{316L}=7950 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$; $\rho_{AlSi10Mg}=2670 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$)

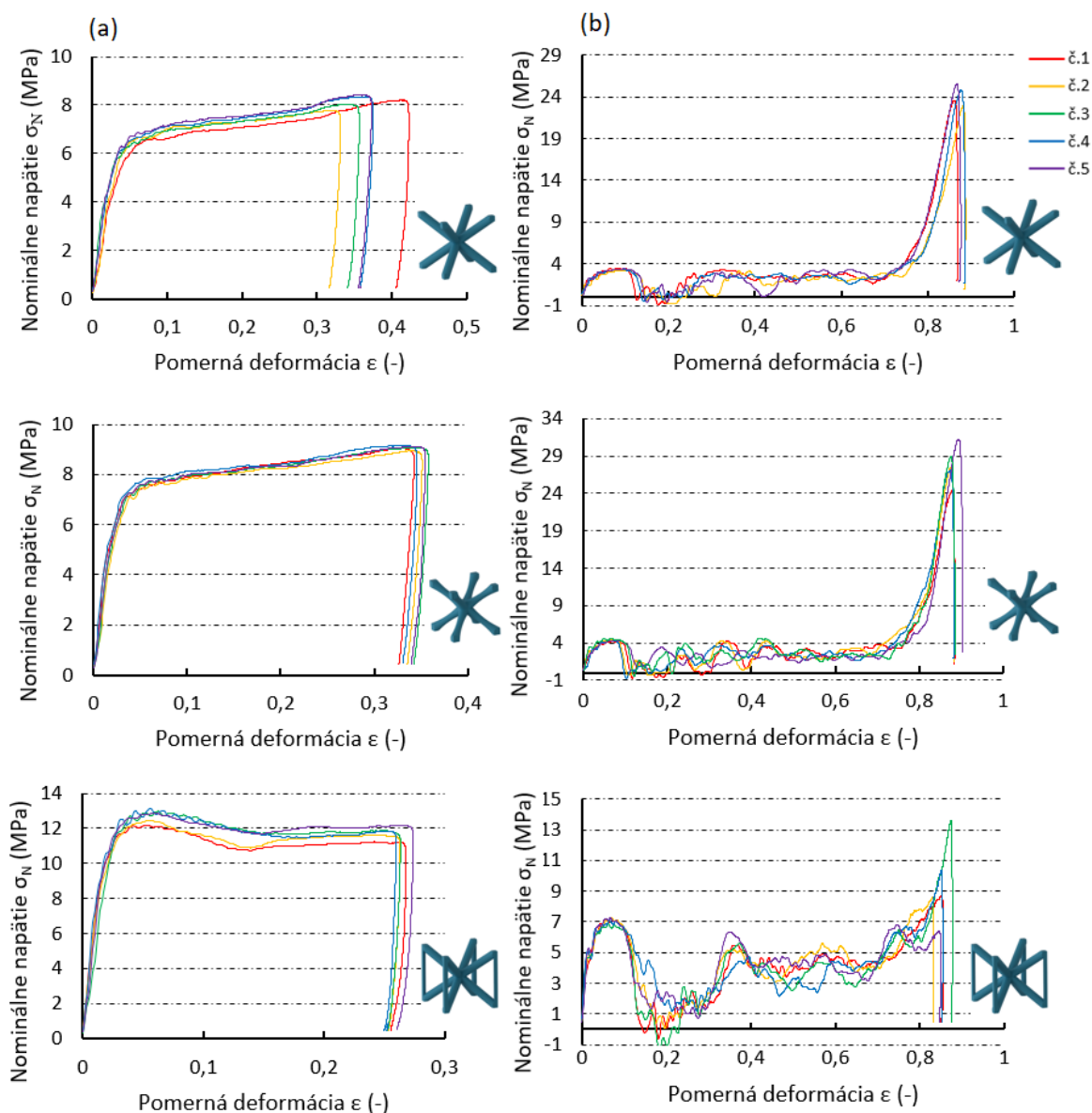
Obr. 5-3 ukazuje porovnanie množstva čiastočne nataveného prášku na jednotlivých stranách prútov. V smere stavby sa na spodnej strane prútov vyskytuje výrazne väčšie množstvo prášku, čo prispieva k miernemu zvýšeniu tuhosti v smere stavby a rovnako k zvýšeniu celkovej hmotnosti vzoriek.



obr. 5-3 Fotografie BCC štruktúry pomocou optického mikroskopu: (a) AlSi₁₀Mg; (b) 316L. Červené značky reprezentujú smer stavby

5.1 Výsledky pádového testu

Údaje z pádového testu boli použité na zostrojenie grafickej závislosti nominálneho napätia σ_N na pomernej deformácii ε . Nominálne napätie bolo určené ako podiel reakčnej sily F a celkovej plochy podstavy $S = (a \cdot b)$. Obr. 5-4 ukazuje krivky napätia pre všetky testované vzorky.



obr. 5-4 Krivky napätia získané z pádového testu: (a) 316L; (b) AlSi₁₀Mg; (vzorka BCC3 z materiálu AlSi₁₀Mg - defektná) Pozn.: Farebné označenie štruktúr uvedené na tomto obrázku je zhodné pre všetky ostatné grafické závislosti

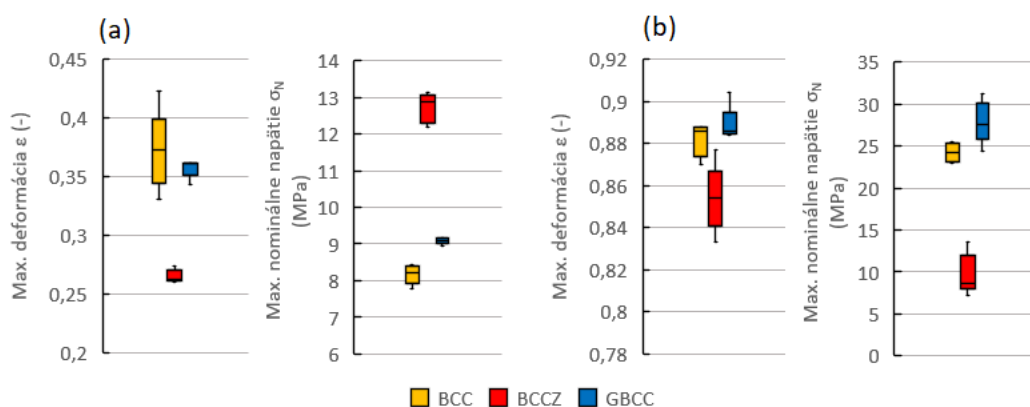
Na prvý pohľad je zjavné, že chovanie oceľových a hliníkových štruktúr je značne odlišné. V prípade oceľových vzoriek krivka napätia začína lineárnou oblasťou, za ktorou nasleduje dlhá oblasť približne konštantného napätia (plateau stress). Priebeh krivky je pomerne hladký, čo odpovedá teoretickým poznatkom o húževnatom materiáli akým je oceľ [15].

Môžeme pozorovať, že pri žiadnej geometrickej konfigurácii z ocele 316L nebola dosiahnutá deformácia na počiatku denzifikácie, dôkazom čoho je absencia prudkého nárastu napätia v závere krivky [26]. Vyrobené vzorky mali vyššiu tuhosť ako sa predpokladalo, čo malo za následok, že použité zaťaženie nebolo dostatočné na získanie úplnej krivky napätia. BCC vzorky vykazujú spomedzi všetkých geometrií najnižšiu tuhosť, čo rovnako odpovedá teoretickým predpokladom [24] [21]. Dôkazom toho sú najväčšie dosiahnuté hodnoty deformácie a fakt, že oblasť plateau stress začína na najnižších hodnotách napätia.

Ďalej môžeme pozorovať medzi jednotlivými vzorkami BCC značné rozdiely v maximálnej hodnote deformácie. Je to spôsobené rozdielom rýchlostí pádovej hlavice pred nárazom, ktorý dosahuje až 15,4 % (tab. 5-2). Priebeh krivky napätia GBCC štruktúr je veľmi podobný ako v prípade konfigurácie BCC, rozdielne sú však maximálne hodnoty napätia a deformácie (obr. 5-5). Obidve geometrické konfigurácie vykazujú v oblasti plateau stress plynulú spevňujúcu charakteristiku. Naopak pri štruktúrach BCCZ môžeme na konci lineárnej oblasti pozorovať peak napätia nasledovaný zmäkčujúcim chovaním a ustálením napätia na konštantnej hodnote. To je spôsobené vyššou konektivitou štruktúry BCCZ. Vzorky BCCZ teda do istej miery vykazujú deformačné chovanie typické pre stretching-dominated štruktúry. Maximálna hodnota deformácie spomedzi všetkých geometrií bola najnižšia práve v prípade BCCZ štruktúr (obr. 5-5).

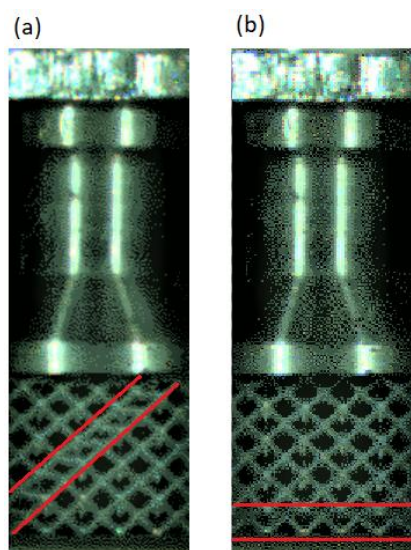
Štruktúra	316L					AlSi10Mg				
	σ_N^{max} (MPa)	x_{max} (MPa)	t (ms)	v_0 (ms ⁻¹)	σ_N^{max} (MPa)	σ_{N1}^{max} (MPa)	x_{max} (mm)	t (ms)	v_0 (ms ⁻¹)	
BCC	1	8,21	8,59	8,39	2,33	23,57	3,51	17,83	11,26	2,37
	2	7,80	6,72	7,60	2,02	22,93	3,24	18,21	11,44	2,37
	3	8,04	7,26	7,90	2,14	-	-	-	-	-
	4	8,35	7,62	7,91	2,22	24,80	3,37	18,17	11,19	2,41
	5	8,43	7,56	7,89	2,23	25,54	3,42	17,90	10,90	2,44
\bar{x}	8,17	7,55	7,94	2,19	24,21	3,39	18,03	11,20	2,40	
BCCZ	1	12,19	5,42	5,74	2,32	8,69	7,16	17,39	12,86	2,53
	2	12,43	5,34	5,44	2,34	8,62	7,25	16,97	11,74	2,55
	3	12,97	5,34	5,46	2,36	13,59	6,93	17,90	11,47	2,57
	4	13,12	5,28	5,35	2,36	10,33	7,14	17,38	11,77	2,56
	5	12,88	5,57	5,57	2,41	7,24	7,24	17,30	12,84	2,57
\bar{x}	12,72	5,39	5,51	2,36	9,70	7,14	17,39	12,14	2,56	
GBCC	1	9,07	6,96	7,19	2,25	24,39	4,20	17,98	11,02	2,44
	2	8,96	7,17	7,25	2,27	27,51	4,49	18,04	10,76	2,48
	3	9,09	7,29	7,31	2,30	28,90	4,63	18,10	10,92	2,50
	4	9,17	7,08	7,17	2,28	27,11	4,25	18,00	10,69	2,52
	5	9,12	7,26	7,24	2,31	31,30	4,36	18,45	10,68	2,54
\bar{x}	9,08	7,15	7,23	2,28	27,84	4,39	18,11	10,81	2,50	

tab. 5-2 Prehľad výsledkov z pádového testu: σ_N^{max} - max. hodnota nominálneho napätia; x_{max} - max. deformácia vzorky; t - dĺžka deformácie; v_0 - počiatočná rýchlosť pádovej hlavice; (hodnota σ_{N1}^{max} bola v prípade vzoriek AlSi10Mg určená iba po prvý pokles napätia viz. Obr. 5-7)



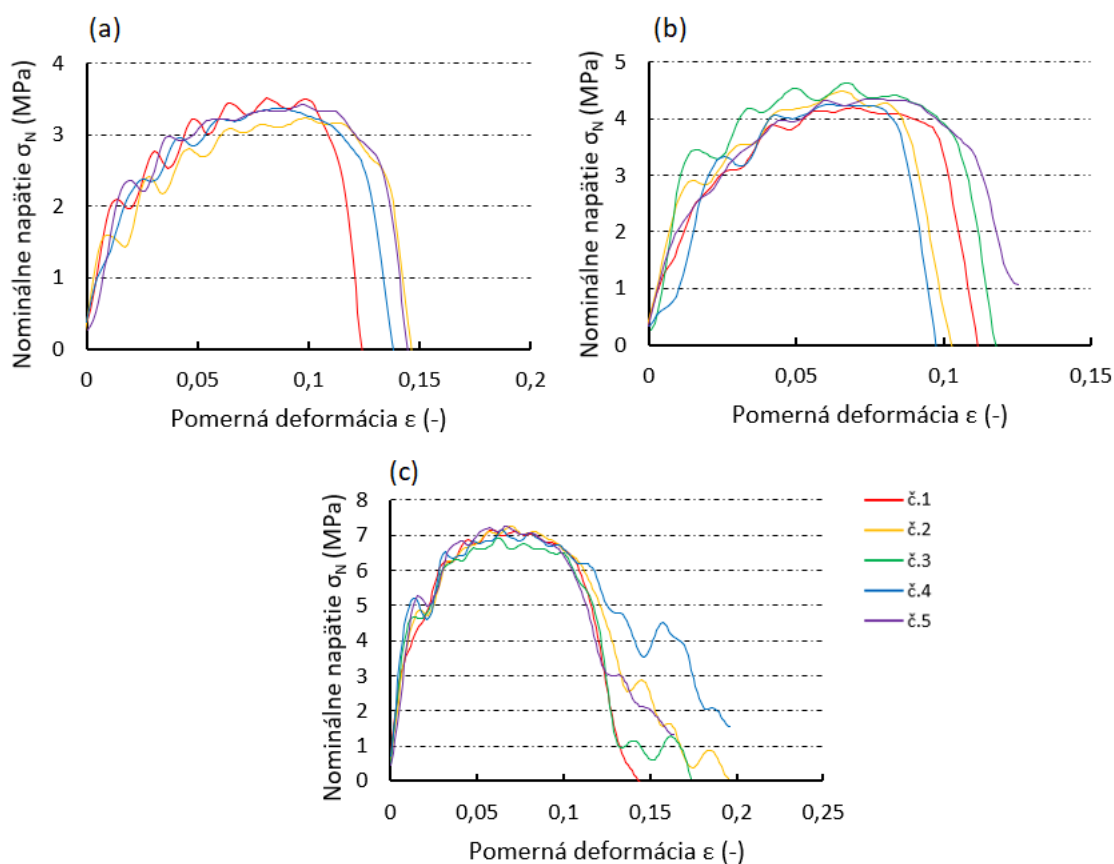
obr. 5-5 Prehľad intervalov maximálnych hodnôt deformácie a nominálneho napätia pre jednotlivé geometrické konfigurácie: (a) 316L; (b) AlSi₁₀Mg

Krivky napätia hliníkových vzoriek majú značne komplikovanejší priebeh. Pri všetkých vzorkách bola dosiahnutá maximálna deformácia, to znamená, že štruktúry boli nárazom pádovej hlavice rozdrtené. Všetky tri geometrické konfigurácie vykazujú na hodnote deformácie približne 10-15 % pokles napätia až na nulovú. Tento moment odpovedá ulomeniu prútov v určitej rovine. U 60 % testovaných vzoriek nastalo ustrihnutie prútov po diagonálnej rovine pod uhlom 45° (obr. 5-6a). U zvyšných vzoriek ulomenie prútov nastalo v smere kolmom na pohyb pádovej hlavice (Obr. 5-6b). Štruktúra od okamihu ustrihnutia prútov nie je kompaktná. Aj napriek ulomeniu vrstvy prútov štruktúra stále kladie odpor voči deformácii a krivka napätia pokračuje do oblasti plateau stress. V tejto oblasti dochádza k výraznej fluktuácii napätia, v niektorých prípadoch hodnota napätia opäť poklesne až na nulovú hodnotu. V záverečnej časti krivky pozorujeme prudký nárast napätia, ktorý odpovedá denzifikácii štruktúry. V prípade štruktúr BCCZ nie je konečný peak napätia až tak badateľný ako u zvyšných dvoch geometrických konfigurácií.



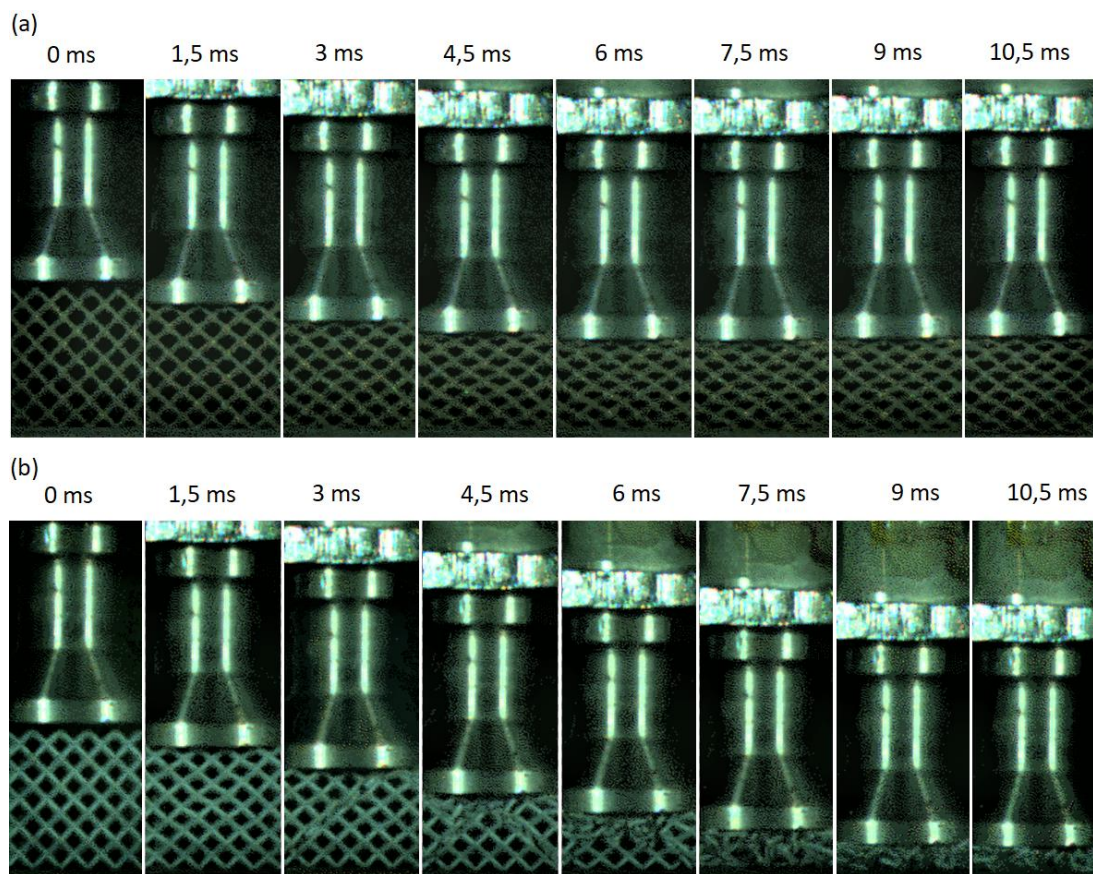
obr. 5-6 Snímky vzoriek AlSi₁₀Mg z vysokorýchlostnej kamery zobrazujúce ulomenie prútov v rovine u štruktúry BCCZ: (a) diagonálnej; (b) horizontálnej

Na obr. 5-7 môžeme detailnejšie pozorovať priebeh kriviek hliníkových štruktúr po prvý pokles napätia. Tento moment je zásadný, pretože dochádza k prvému porušeniu štruktúry. Mikro-prútové štruktúry s presne navrhnutou geometriou strácajú pri porušení svoju plnú funkčnosť. Preto je možné uvažovať, že chovanie štruktúry po prvom poklese napätia už nie je relevantné. V tejto oblasti dochádza k viditeľnej fluktuácii napätia u všetkých vzoriek. Rovnako ako v prípade oceľových štruktúr krivky napätia začínajú oblasťou, ktorá má približne lineárny priebeh. Koniec tejto oblasti však nastáva pri nižších hodnotách deformácie. Medzi jednotlivými vzorkami v rámci jednej geometrickej konfigurácie vznikajú značné odchýlky, či už v maximálnej hodnote deformácie alebo napätia (tab. 5-2). Najvyššiu tuhosť opäť vykazuje štruktúra BCCZ, dôkazom čoho sú najvyššie dosiahnuté hodnoty napätia (tab. 5-2).



obr. 5-7 Časť krivky napätia pre vzorky z hliníkovej zliatiny do okamihu ulomenia prútov: (a) BCC; (b) GBCC; (c) BCCZ

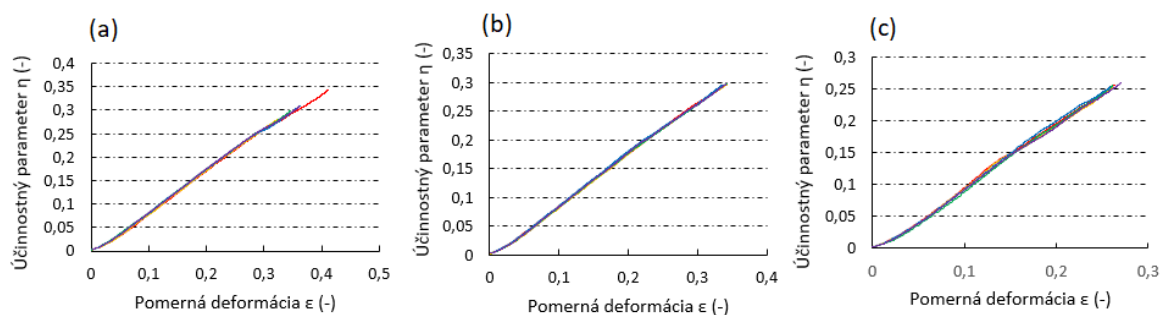
Pre názorné porovnanie priebehu deformácie pre vzorky z oboch materiálov je na obr. 5-8 zobrazený záznam z vysokorýchlostnej kamery. U oceľovej štruktúry pozorujeme plynulú deformáciu po celom objeme štruktúry zatiaľ čo u hliníkovej štruktúry dochádza ku krehkému porušeniu prútov v určitých lokálnych oblastiach. Prvé porušenie prútov nastáva v diagonálnej rovine, tak ako opisuje obr. 5-6a. Na obr. 5-8 je jasne viditeľný rozdiel v maximálnej deformácii oceľových a hliníkových vzoriek.



obr. 5-8 Vizuálne porovnanie deformácie štruktúry BCC zo záznamu z vysokorýchlostnej kamery: (a) 316L; (b) AISi₁₀Mg

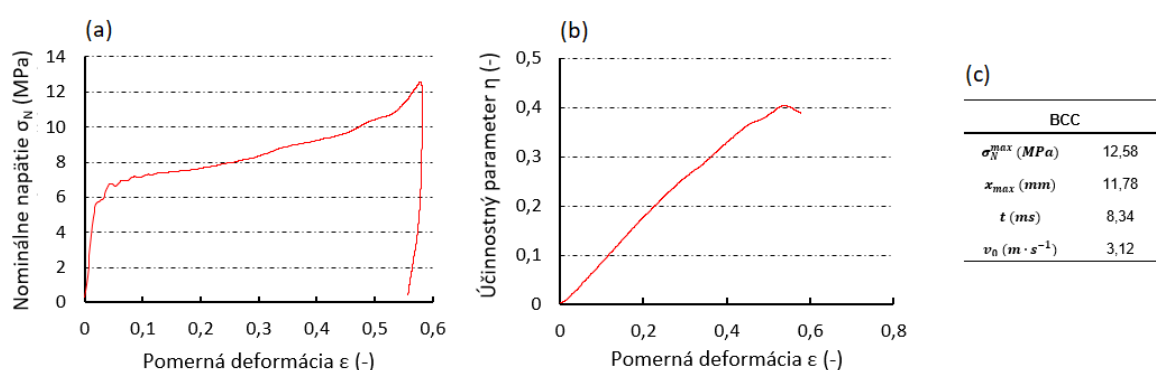
5.2 Vyhodnotenie absorpcie energie

Na určenie limitnej hodnoty deformácie boli zostrojené krivky účinnosti pre všetky testované vzorky. V prípade ocelových štruktúr bol priebeh lineárny a v rámci jednej geometrickej konfigurácie vzorky vykazovali takmer identické hodnoty smernice priamky (obr. 5-9). Pri pádovom teste však nebola dosiahnutá deformácia na počiatku denzifikácie, a teda nebola dosiahnutá ani maximálna účinnosť absorpcie energie.



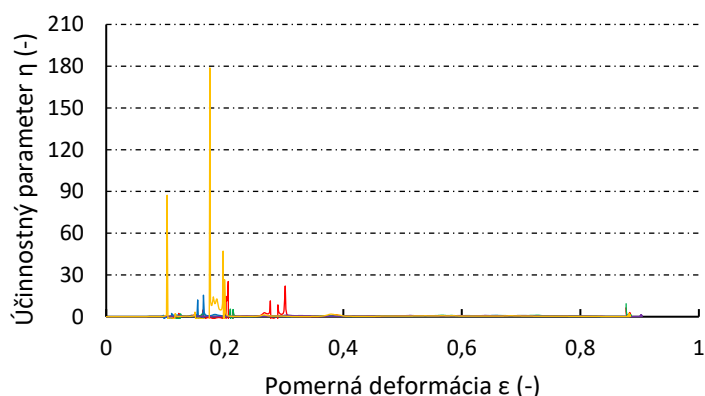
obr. 5-9 Krivky účinnosti pre štruktúry 316L: (a) BCC; (b) GBCC; (c) BCCZ

Na porovnanie dosiahnutých výsledkov a preukázanie platnosti metódy, ktorá sleduje účinnosť absorpcie energie, boli so súhlasom autora vyhodnotené dáta z pádového testu, kde deformácia vzorky dosiahla oblasť denzifikácie [35]. Aj v tomto prípade sa jednalo o test štruktúry BCC vyrobenej z ocele 316L. Rozmery štruktúry boli zhodné s BCC vzorkami testovanými v tejto práci, t.j. veľkosť elementárnej bunky bola 4 mm a priemer prútov bol 0,6 mm. Vzorka bola testovaná nárazom pádovej hlavice o hmotnosti 8,45 kg z výšky 1m, čo značí rovnaké zaťažovacie podmienky. Na obr. 5-10b môžeme pozorovať, že krivka účinnosti dosahuje svoje maximum pri hodnote pomernej deformácie 54% a táto hodnota odpovedá deformácii na počiatku denzifikácie, po ktorú je štruktúra schopná efektívne absorbovať energiu. Dôvodom dosiahnutia dostatočne veľkej deformácie vzorky je vyššia rýchlosť pádovej hlavice (obr. 5-10c). Maximálna deformácia vzoriek z ocele 316L testovaných v tejto práci je 42,3 % u vzorky BCC1.



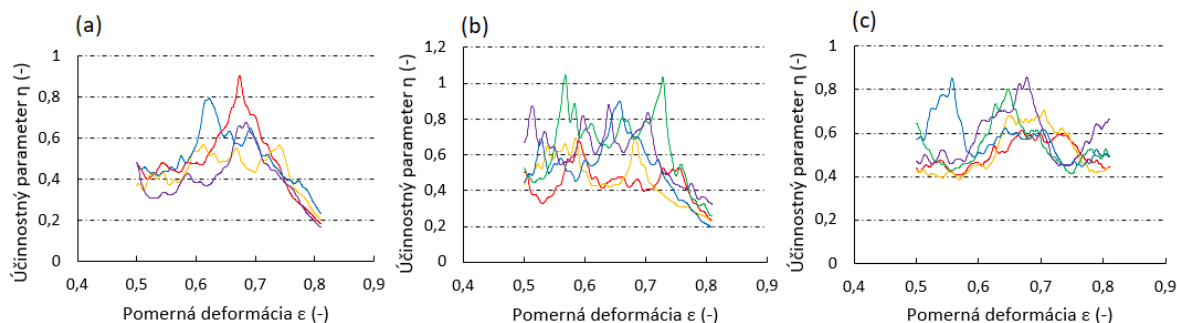
obr. 5-10 Výsledky pádového testu pre vzorku BCC z ocele 316L z rozdielnej výrobnéj série [35]: (a) závislosť napätia na deformácii; (b) krivka účinnosti; (c) prehľad číselných hodnôt

V prípade hliníkových štruktúr poklesy napätia až k nulovým hodnotám spôsobujú obrovské peaky v účinnosti absorpcie energie (rov. 2-7). To odhaľuje nestabilitu tejto metódy v prípadoch, keď dochádza k značnej fluktuácii napätia. Úplné krivky účinnosti boli vynesené iba pre vzorky GBCC kvôli názornosti (obr. 5-11), pretože neposkytujú relevantné údaje o schopnosti štruktúry absorbovať energiu. Môžeme však pozorovať, že výrazné skoky v napätí sa nachádzajú iba v prvej polovici deformácie vzoriek.



obr. 5-11 Úplné krivky účinnosti absorpcie energie pre hliníkové štruktúry GBCC

Preto boli zostrojené krivky účinnosti od hodnoty deformácie 50 % po deformáciu, v ktorej štruktúra dosiahne maximálnu hodnotu napätia (obr. 5-12). Priebeh kriviek je oproti ocelovým vzorkám stále značne komplikovaný, ale aj napriek tomu sme schopní pre každú štruktúru určiť maximálnu účinnosť absorpcie energie a k nej príslušnú deformáciu, t.j. deformáciu na počiatku denzifikácie.



obr. 5-12 Čiastočné krivky účinnosti hliníkových vzoriek: (a) BCC; (b) GBCC; (c) BCCZ

Tab. 5-3 ponúka prehľad hodnôt absorbovanej energie určenej ako obsah plochy pod krivkou napätia (rov. 2-3). Najnižšia deformácia spomedzi všetkých vyrobených vzoriek bola zaznamenaná pre štruktúru BCCZ4 z ocele 316L, konkrétne je to hodnota deformácie 26 %. K tejto deformácii bola vypočítaná absorbovaná energia pre všetky vyrobené vzorky, $W_{26\%}$. V prípade ocelových vzoriek nebola dosiahnutá denzifikačná oblasť, a teda ani maximálna účinnosť absorpcie energie. Preto pre ocelové vzorky bolo ďalej vypočítané množstvo pohltenej energie po maximálnu dosiahnutú hodnotu deformácie, W_{max} . Pre hliníkové vzorky bola vypočítaná absorbovaná energia po prvý pokles napätia na nulovú hodnotu, W_1 , a energia po deformáciu na počiatku denzifikácie, určenú z kriviek účinnosti, W_d .

Štruktúra		316L		AlSi ₁₀ Mg		
		$W_{26\%}$ (MJ · m ⁻³)	W_{max} (MJ · m ⁻³)	$W_{26\%}$ (MJ · m ⁻³)	W_1 (MJ · m ⁻³)	W_d (MJ · m ⁻³)
BCC	1	1,64	2,82	0,43	0,34	1,48
	2	1,70	2,19	0,38	0,37	1,08
	3	1,72	2,39	-	-	-
	4	1,75	2,57	0,41	0,36	1,29
	5	1,77	2,59	0,45	0,39	1,41
\bar{x}		1,72	2,51	0,42	0,37	1,32
BCCZ	1	2,84	2,87	0,84	0,75	2,43
	2	2,89	2,90	0,94	0,87	2,76
	3	2,98	2,99	0,80	0,77	2,20
	4	2,94	2,94	1,12	1,01	2,04
	5	3,03	3,15	0,97	0,82	2,69
\bar{x}		2,94	2,97	0,97	0,84	2,42
GBCC	1	1,99	2,62	0,45	0,36	1,20
	2	1,94	2,66	0,48	0,34	1,50
	3	1,97	2,70	0,68	0,43	1,50
	4	2,02	2,70	0,47	0,30	1,48
	5	1,98	2,71	0,69	0,42	1,43
\bar{x}		1,98	2,68	0,52	0,37	1,42

tab. 5-3 Prehľad hodnôt absorbovanej energie W

Hodnoty energii v tab. 5-3 však nezohľadňujú hustotu jednotlivých materiálov, a preto boli k vyššie uvedeným deformáciám vypočítané aj hodnoty špecifickej absorpcie energie (rov. 2-4). Prehľad hodnôt energie vztiahnutej na jednotku hmotnosti je uvedený v tab. 5-4. Pre porovnanie absorpčných vlastností materiálov budú ďalej uvažované iba hodnoty špecifickej absorpcie energie.

Štruktúra		316L		AlSi ₁₀ Mg		
		$\bar{W}_{26\%}$ (kJ · kg ⁻¹)	\bar{W}_{max} (kJ · kg ⁻¹)	$\bar{W}_{26\%}$ (kJ · kg ⁻¹)	\bar{W}_1 (kJ · kg ⁻¹)	\bar{W}_d (kJ · kg ⁻¹)
BCC	1	1,88	3,22	1,36	1,08	4,70
	2	1,93	2,48	1,24	1,21	3,52
	3	1,97	2,73	-	-	-
	4	1,98	2,91	1,34	1,17	4,20
	5	1,97	2,88	1,43	1,24	4,48
\bar{x}		1,94	2,85	1,34	1,17	4,22
BCCZ	1	3,28	3,31	2,58	2,30	7,46
	2	3,34	3,35	2,89	2,67	8,47
	3	3,38	3,39	2,48	2,38	6,81
	4	3,30	3,30	3,47	3,13	6,31
	5	3,43	3,57	2,98	2,52	8,26
\bar{x}		3,34	3,38	2,88	2,60	7,46
GBCC	1	2,26	2,97	1,37	1,10	3,65
	2	2,24	3,07	1,43	1,01	4,46
	3	2,21	3,03	1,99	1,26	4,39
	4	2,27	3,03	1,41	0,90	4,43
	5	2,24	3,07	2,03	1,24	4,22
\bar{x}		2,24	3,03	1,65	1,10	4,23

tab. 5-4 Prehľad hodnôt špecifickej absorpcie energie \bar{W}

Oceľové štruktúry vo výsledku vykazujú k rovnakej pomernej deformácii ($\varepsilon = 26 \%$) vyššie hodnoty absorbovanej energie ako štruktúry hliníkové. Priemerná hodnota energie $\bar{W}_{26\%}$ oceľových štruktúr je oproti hliníku 1,16 až 1,45krát vyššia v závislosti na geometrickej konfigurácii.

V prípade hliníkových vzoriek je nutné si povšimnúť rozdiely v hodnotách energie \bar{W}_1 a \bar{W}_d . Najväčší rozdiel v priemerných hodnotách \bar{W}_1 a \bar{W}_d je u štruktúry GBCC. V tomto prípade môžeme pozorovať takmer 4násobný nárast absorbovanej energie. Kvôli takýmto zásadným rozdielom je určenie hodnoty deformácie, po ktorú je štruktúra reálne schopná absorbovať energiu, kľúčové.

Z hľadiska geometrickej konfigurácie v prípade obidvoch materiálov vykazuje najlepšiu schopnosť absorbovať energiu štruktúra BCCZ, potom GBCC a najnižšie hodnoty boli zaznamenané pre nemodifikovanú BCC štruktúru.

6 DISKUSIA

Výsledky dynamickej tlakovej skúšky potvrdili, že mechanické vlastnosti mikro-prútových štruktúr značne závisia na ich geometrii a výrobnom materiáli. Základný rozdiel medzi oceľovými a hliníkovými vzorkami je v celkovom priebehu deformácie. Oceľové vzorky vykazujú veľmi konzistentné chovanie a opakovateľnosť výsledkov je na vysokej úrovni, čo reportovali vo svojej práci aj Gümrük a Mines [20]. Príčinou toho je postupná a plynulá deformácia celého objemu štruktúry.

Naopak u hliníkových vzoriek môžeme pozorovať výrazné skoky v napätí v priebehu celej doby deformácie. Kritické porušenie štruktúry, sprevádzané poklesom napätia až na nulovú hodnotu, nastáva po prekročení deformácie približne 10 %. Toto správanie sa zhoduje s výsledkami štúdií zaoberajúcimi sa experimentálnym skúmaním hliníkových štruktúr [27] [33]. Fluktuáciu napätia môžeme prisúdiť krehkému charakteru hliníkovej zliatiny.

Pri pádovom teste hliníkových štruktúr boli zaznamenané aj záporné hodnoty napätia. Tento jav je spôsobený nedokonalosťami testovacieho zariadenia. Pádová hlavica, snímač sily a indenter netvoria dokonalú sústavu, čo môže pri pádovom teste spôsobiť nežiadúci pohyb indentoru. V momente ustrihnutia vrstvy prútov dochádza ku skokovej zmene odporu, ktorý štruktúra kladie voči padajúcemu indentoru, čo má za následok jeho rozkmitanie vo vertikálnom smere. Toto kmitanie spôsobuje, že snímač sily zaznamenáva reakčnú silu pôsobiacu v opačnom smere.

Hodnota maximálnej deformácie oceľových vzoriek bola nižšia ako sa predpokladalo a vo výsledku žiadna zo štruktúr nedosiahla deformáciu na počiatku denzifikácie. Príčinou nižších hodnôt deformácie oproti predchádzajúcim testom na rovnakom testovacom zariadení [35] boli nižšie hodnoty rýchlostí pádovej hlavice. Nedokonalá rovnobežnosť vedenia, na ktorom je pádová hlavica osadená, mohla byť príčinou.

K nižším deformáciám mohla prispieť aj zvýšená tuhosť vzoriek. Skutočné rozmery prútov vyrobených metódou SLM značne závisia na nastavení procesných parametrov. Qiu a kol. [33] zaznamenali, že skutočný priemer prútov z materiálu $\text{AlSi}_{10}\text{Mg}$ sa oproti nominálnej hodnote úmerne zväčšuje s rastúcim výkonom laseru. To má za následok zvýšenie objemového podielu štruktúry a celkovej tuhosti. Nárast relatívnej hustoty oceľových vzoriek oproti nominálnej hodnote bol v priemere 4,4 % zatiaľ čo u hliníkových vzoriek až 14,2 %.

Na porovnanie absorpčných vlastností ocele 316L a hliníkovej zliatiny AlSi10Mg bolo zvolené kritérium špecifickej absorpcie energie. Pri porovnaní absorbovanej energie na jednotku objemu vykazujú ocelové vzorky jednoznačne lepšie výsledky. Tieto hodnoty však nezohľadňujú značný rozdiel v celkovej hmotnosti vyrobených vzoriek. Z výrobných dôvodov sa testované vzorky líšili aj v hodnote relatívnej hustoty. Preto je výhodné na porovnanie dvoch materiálov použiť hodnoty absorbovanej energie normalizované hustotou plného materiálu ρ_s a relatívnou hustotou ρ' .

Pri pohľade na maximálne množstvo špecifickej absorpcie (\bar{W}_{max} , \bar{W}_d) dosiahla hliníková zliatina vyššie hodnoty. Je to však spôsobené rozdielnymi hodnotami deformácie, ku ktorým sa vzťahujú dané množstvá energie. Preto porovnanie týchto dvoch hodnôt nemožno považovať za relevantné zhodnotenie mikro-prúťových štruktúr vyrobených z dvoch materiálov z hľadiska absorpcie energie.

Na adekvátne porovnanie dvoch materiálov je možné použiť hodnoty energie, ktoré sa vzťahujú k rovnakej hodnote deformácie ($\varepsilon = 26\%$). V tomto prípade ocelové vzorky vykazujú vyššie hodnoty špecifickej absorpcie energie $\bar{W}_{26\%}$. Najväčší, 1,45násobný nárast v priemernej špecifickej absorpcii energie bol zaznamenaný pre štruktúru BCC. Pre porovnanie, nárast priemernej absorbovanej energie $W_{26\%}$ pre štruktúru BCC je viac ako 4násobný. To ukazuje zásadný rozdiel v použitých hodnôt W a \bar{W} .

U hliníkových vzoriek sa ďalej vynára otázka, ktorá z uvedených hodnôt absorbovanej energie (\bar{W}_1 , \bar{W}_d) je relevantná. Dalo by sa povedať, že odpoveď závisí od konkrétneho použitia štruktúry v technickej praxi. Ak má štruktúra plniť iba funkciu absorbéru energie a počíta sa s jej úplnou deformáciou, tak je správne uvažovať energiu absorbovanú až po deformáciu na počiatku denzifikácie. Ak však štruktúra okrem absorbovania energie plní funkciu nosnej konštrukcie, tak porušenie celistvosti štruktúry by spôsobilo kolaps celej sústavy. V tomto prípade možno uvažovať iba energiu absorbovanú do okamihu prvého ustrihnutia prúťov.

Z hľadiska topologického usporiadania dosiahla v prípade oboch materiálov najlepšie výsledky štruktúra BCCZ. Treba však dodať, že štruktúra BCCZ dosiahla u oboch materiálov aj najvyššie hodnoty nominálneho napätia, čo predstavuje väčšie riziko nežiadúceho porušenia štruktúry. Nevýhodou tejto štruktúry je aj fakt, že zlepšenie mechanických vlastností nastáva iba v smere zvislých prúťov. U ocelových BCCZ štruktúr sa vyskytuje po úvodnom peaku napätia čiastočne zmäkčujúca charakteristika, čo značí, že táto štruktúra vykazuje deformačné chovanie typické pre stretching-dominated štruktúry. Tento jav však zásadne neovplyvnil schopnosť štruktúry absorbovať energiu, pretože pokles napätia v oblasti plateau stress je minimálny.

Priebeh krivky napätia štruktúr BCC a GBCC je takmer identický. Vyššie hodnoty plateau stress a nižšia maximálna deformácia GBCC štruktúr značia zvýšenie tuhosti oproti nemodifikovanej BCC štruktúre, čo potvrdzuje závery štúdie Bai a kol. [24].

7 ZÁVER

Cieľom bakalárskej práce bolo porovnať schopnosť mikro-prúťových štruktúr vyrobených metódou SLM absorbovať mechanickú energiu v závislosti na základnom materiáli a topológii elementárnej bunky.

Testovacie vzorky boli navrhnuté v troch geometrických konfiguráciách založených na priestorovo centrovanej kubickej mriežke: BCC, BCCZ a GBCC. Rozmery štruktúr boli volené s ohľadom na výrobitelnosť metódou SLM a možnosti testovacieho zariadenia. Na výrobu boli použité dva materiály: oceľ 316L a hliníková zliatina AlSi₁₀Mg. Všetky vyrobené vzorky boli testované na impact testeri navrhnutom na Fakulte strojního inžinierstva VUT v Brne.

Oceľové štruktúry vykazovali veľmi konzistentné chovanie s vysokou mierou opakovateľnosti výsledkov. Naopak u hliníkových štruktúr vznikali v priebehu deformácie väčšie rozdiely, čo sa odzrkadlilo aj na hodnotách absorbovanej energie. Na porovnanie absorpčných vlastností štruktúr z dvoch materiálov bolo zvolené kritérium špecifickej absorpcie energie, pretože najlepšie zachytáva rozdiely skúmaných materiálov a eliminuje rozdiely v objemovom podiele jednotlivých vzoriek. Pre oceľové štruktúry bol v porovnaní špecifickej absorpcie energie vzťahujúcej sa k deformácii $\varepsilon = 26 \%$ zaznamenaný nárast oproti hliníkovým štruktúram:

- o 45 % pre BCC
- o 16 % pre BCCZ
- o 36 % pre GBCC

Pre porovnanie topológie bola séria BCC stanovená ako referenčná. V prípade hliníkových vzoriek bol nameraný nárast špecifickej absorpcie energie vzťahujúcej sa k deformácii na počiatku denzifikácie:

- o 77 % pre BCCZ
- o 0,1 % pre GBCC

U oceľových vzoriek nebola dosiahnutá deformácia na počiatku denzifikácie, a tak bol vplyv topológie opäť určený zo špecifickej absorpcie energie vzťahujúcej sa k deformácii $\varepsilon = 26 \%$. Nárast absorbovanej energie je nasledovný:

- o 72 % pre BCCZ
- o 15 % pre GBCC

Z uvedených výsledkov vyplýva, že v porovnaní materiálov vykazuje lepšie absorpčné vlastnosti oceľ 316L a štruktúra BCCZ výrazne prekonala zvyšné dve geometrické konfigurácie.

Všetky ciele bakalárskej práce boli úspešne splnené.

8 ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV

- [1] KOUTNÝ, Daniel. *Experimentální studium vlastností strukturovaných dílů vyrobených technologií selective laser melting* [online]. B.m., 2016. Vysoké učení technické v Brně. Dostupné z: doi:554
- [2] AHMADI, Arman, Reza MIRZAEIFAR, Narges Shayesteh MOGHADDAM, Ali Sadi TURABI, Haluk E. KARACA a Mohammad ELAHINIA. Effect of manufacturing parameters on mechanical properties of 316L stainless steel parts fabricated by selective laser melting: A computational framework. *Materials and Design* [online]. 2016, **112**, 328–338. ISSN 18734197. Dostupné z: doi:10.1016/j.matdes.2016.09.043
- [3] TOLOSA, Itziar, Fermín GARCIAINDÍA, Fidel ZUBIRI, Fidel ZAPIRAIN a Aritz ESNAOLA. Study of mechanical properties of AISI 316 stainless steel processed by „selective laser melting“, following different manufacturing strategies. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. 2010. ISSN 02683768. Dostupné z: doi:10.1007/s00170-010-2631-5
- [4] CHILDS, T. H.C., C. HAUSER a M. BADROSSAMAY. Mapping and modelling single scan track formation in direct metal selective laser melting. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* [online]. 2004. ISSN 00078506. Dostupné z: doi:10.1016/S0007-8506(07)60676-3
- [5] YAP, C. Y., C. K. CHUA, Z. L. DONG, Z. H. LIU, D. Q. ZHANG, L. E. LOH a S. L. SING. Review of selective laser melting: Materials and applications. *Applied Physics Reviews* [online]. 2015, **2**(4). ISSN 19319401. Dostupné z: doi:10.1063/1.4935926
- [6] HOSFORD, William F. *Physical metallurgy, second edition* [online]. 2010. ISBN 9781439882863. Dostupné z: doi:10.1201/b15858
- [7] OLAKANMI, E. O., R. F. COCHRANE a K. W. DALGARNO. A review on selective laser sintering/melting (SLS/SLM) of aluminium alloy powders: Processing, microstructure, and properties. *Progress in Materials Science* [online]. 2015, **74**, 401–477. ISSN 00796425. Dostupné z: doi:10.1016/j.pmatsci.2015.03.002
- [8] KEMPEN, K., L. THIJS, J. VAN HUMBEECK a J. P. KRUTH. Mechanical Properties of AlSi10Mg Produced by Selective Laser Melting. In: *Physics Procedia* [online]. 2012. ISSN 18753892. Dostupné z: doi:10.1016/j.phpro.2012.10.059
- [9] BONATTI, Colin a Dirk MOHR. Mechanical performance of additively-manufactured anisotropic and isotropic smooth shell-lattice materials: Simulations & experiments. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* [online]. 2019. ISSN 00225096. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmps.2018.08.022
- [10] GIBSON, Lorna J. a Michael F. ASHBY. *Cellular solids: Structure and properties, second edition* [online]. 2014. ISBN 9781139878326. Dostupné z: doi:10.1017/CBO9781139878326
- [11] YAN, Chunze, Liang HAO, Ahmed HUSSEIN, Simon Lawrence BUBB, Philippe YOUNG a David RAYMONT. Evaluation of light-weight AlSi10Mg periodic cellular lattice structures fabricated via direct metal laser sintering. *Journal of Materials Processing Technology* [online]. 2014, **214**(4), 856–864. ISSN 09240136. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmatprotec.2013.12.004

- [12] ZHANG, Lei, Stefanie FEIH, Stephen DAYNES, Shuai CHANG, Michael Yu WANG, Jun WEI a Wen Feng LU. Energy absorption characteristics of metallic triply periodic minimal surface sheet structures under compressive loading. *Additive Manufacturing* [online]. 2018, **23**(July), 505–515. ISSN 22148604. Dostupné z: doi:10.1016/j.addma.2018.08.007
- [13] ASHBY, M. F. The properties of foams and lattices. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* [online]. 2006. ISSN 1364503X. Dostupné z: doi:10.1098/rsta.2005.1678
- [14] YING, Sing, Chen-nan SUN, Kah FAI a Jun WEI. Materials & Design Compressive properties of functionally graded lattice structures manufactured by selective laser melting. *Materials & Design* [online]. 2017, **131**(March), 112–120. ISSN 0264-1275. Dostupné z: doi:10.1016/j.matdes.2017.06.006
- [15] TANCOGNE-DEJEAN, Thomas a Dirk MOHR. Stiffness and specific energy absorption of additively-manufactured metallic BCC metamaterials composed of tapered beams. *International Journal of Mechanical Sciences* [online]. 2018, **141**(March), 101–116. ISSN 00207403. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijmecsci.2018.03.027
- [16] *How 3D Printed Lattice Structures Improve Mechanical Properties - 3D Printing* [online]. [vid. 2020-06-21]. Dostupné z: <https://3dprinting.com/tips-tricks/3d-printed-lattice-structures/>
- [17] DESHPANDE, V. S., M. F. ASHBY a N. A. FLECK. Foam topology: Bending versus stretching dominated architectures. *Acta Materialia* [online]. 2001, **49**(6), 1035–1040. ISSN 13596454. Dostupné z: doi:10.1016/S1359-6454(00)00379-7
- [18] BAUER, Jens, Lucas R. MEZA, Tobias A. SCHAEGLER, Ruth SCHWAIGER, Xiaoyu ZHENG a Lorenzo VALDEVIT. Nanolattices: An Emerging Class of Mechanical Metamaterials. *Advanced Materials* [online]. 2017, **29**(40). ISSN 15214095. Dostupné z: doi:10.1002/adma.201701850
- [19] USHIJIMA, K., W. J. CANTWELL, R. A.W. MINES, S. TSOPANOS a M. SMITH. An investigation into the compressive properties of stainless steel micro-lattice structures. *Journal of Sandwich Structures and Materials* [online]. 2011. ISSN 10996362. Dostupné z: doi:10.1177/1099636210380997
- [20] GÜMRÜK, R. a R. A.W. MINES. Compressive behaviour of stainless steel micro-lattice structures. *International Journal of Mechanical Sciences* [online]. 2013, **68**, 125–139. ISSN 00207403. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijmecsci.2013.01.006
- [21] GÜMRÜK, Recep, R. A.W. MINES a Sami KARADENİZ. Static mechanical behaviours of stainless steel micro-lattice structures under different loading conditions. *Materials Science and Engineering A* [online]. 2013. ISSN 09215093. Dostupné z: doi:10.1016/j.msea.2013.07.070
- [22] MCKOWN, S., Y. SHEN, W. K. BROOKES, C. J. SUTCLIFFE, W. J. CANTWELL, G. S. LANGDON, G. N. NURICK a M. D. THEOBALD. The quasi-static and blast loading response of lattice structures. *International Journal of Impact Engineering* [online]. 2008. ISSN 0734743X. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijimpeng.2007.10.005

- [23] MACONACHIE, Tobias, Martin LEARY, Bill LOZANOVSKI, Xuezhe ZHANG, Ma QIAN, Omar FARUQUE a Milan BRANDT. SLM lattice structures: Properties, performance, applications and challenges. *Materials and Design* [online]. 2019, **183**, 108137. ISSN 18734197. Dostupné z: doi:10.1016/j.matdes.2019.108137
- [24] BAI, Long, Changyan YI, Xiaohong CHEN a Yuanxi SUN. Effective Design of the Graded Strut of BCC Lattice. *Materials*. 2019.
- [25] HARRIS, J. A., R. E. WINTER a G. J. MCSHANE. Impact response of additively manufactured metallic hybrid lattice materials. *International Journal of Impact Engineering* [online]. 2017, **104**, 177–191. ISSN 0734743X. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijimpeng.2017.02.007
- [26] LI, Q. M., I. MAGKIRIADIS a J. J. HARRIGAN. Compressive strain at the onset of densification of cellular solids. *Journal of Cellular Plastics* [online]. 2006, **42**(5), 371–392. ISSN 0021955X. Dostupné z: doi:10.1177/0021955X06063519
- [27] AL-SAEDI, Dheyaa S J, S H MASOOD, Muhammad FAIZAN-UR-RAB, Amer ALOMARAH a P PONNUSAMY. Mechanical properties and energy absorption capability of functionally graded F2BCC lattice fabricated by SLM. *Materials & Design* [online]. 2018, **144**, 32–44. ISSN 0264-1275. Dostupné z: doi:10.1016/j.matdes.2018.01.059
- [28] SUN, Yongle a Q M LI. International Journal of Impact Engineering Dynamic compressive behaviour of cellular materials : A review of phenomenon , mechanism and modelling [online]. 2018, **112**(February 2017), 74–115. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijimpeng.2017.10.006
- [29] ASHBY, MF, A EVANS, NA FLECK, LJ GIBSON, JW HUTCHINSON, HNG WADLEY, a F DELALE,. Metal Foams: A Design Guide. *Applied Mechanics Reviews* [online]. 2001. ISSN 0003-6900. Dostupné z: doi:10.1115/1.1421119
- [30] BELINGARDI, G., R. MONTANINI a M. AVALLE. Characterization of polymeric structural foams under compressive impact loading by means of energy-absorption diagram. *International Journal of Impact Engineering*. 2001, **25**(5), 455–472.
- [31] VRÁNA, Radek, Ondrej CERVINEK, Pavel MANAS, Daniel KOUTNÝ a David PALOÚŠEK. Dynamic loading of lattice structure made by selective laser melting-numerical model with substitution of geometrical imperfections. *Materials* [online]. 2018, **11**(11), 14–16. ISSN 19961944. Dostupné z: doi:10.3390/ma11112129
- [32] HANZL, Pavel, Miroslav ZETEK, Tomáš BAKŠA a Tomáš KROUPA. The influence of processing parameters on the mechanical properties of SLM parts. *Procedia Engineering* [online]. 2015, **100**(January), 1405–1413. ISSN 18777058. Dostupné z: doi:10.1016/j.proeng.2015.01.510
- [33] QIU, Chunlei, Sheng YUE, Nicholas J.E. ADKINS, Mark WARD, Hany HASSANIN, Peter D. LEE, Philip J. WITHERS a Moataz M. ATTALLAH. Influence of processing conditions on strut structure and compressive properties of cellular lattice structures fabricated by selective laser melting. *Materials Science and Engineering A* [online]. 2015, **628**, 188–197. ISSN 09215093. Dostupné z: doi:10.1016/j.msea.2015.01.031

- [34] LI, Chuanlei, Hongshuai LEI, Yabo LIU, Xiaoyu ZHANG, Jian XIONG a Hao ZHOU. International Journal of Mechanical Sciences Crushing behavior of multi-layer metal lattice panel fabricated by selective laser melting. *International Journal of Mechanical Sciences* [online]. 2018, **145**(July), 389–399. ISSN 0020-7403. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijmecsci.2018.07.029
- [35] NOSEK, Jakub. *Vliv výšky vrstvy na kritický úhel aditivně vyráběných mikro-prutových struktur*. Brno, 2019. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně.

9 ZOZNAM POUŽITÝCH SKRATIEK, SYMBOLOV A VELIČÍN

Symbol/veličina	Jednotka	Popis
d	mm	priemer prútu
E_s	GPa	Youngov modul plného materiálu
F	N	reakčná sila
h	mm	výška štruktúry
L	mm	dĺžka hrany bunky
m	g	hmotnosť
M	-	Maxwellove číslo
n	-	počet uzlov
s	-	počet prútov
S	mm ²	plocha
t	ms	čas
T	°C	teplota
v_0	m·s ⁻¹	počiatočná rýchlosť pádovej hlavice
W	MJ·m ⁻³	energia absorbovaná na jednotku objemu
\bar{W}	kJ·kg ⁻¹	energia absorbovaná na jednotku hmotnosti
x_{max}	mm	maximálna deformácia štruktúry
Z	-	konektivita
ρ_s	kg·m ⁻³	hustota plného materiálu
ρ^*	kg·m ⁻³	hustota bunky
ρ'	-	relatívna hustota
σ	MPa	napätie
σ_N	MPa	nominálne napätie
σ_P	MPa	kritické napätie

ε	-	pomerná deformácia
ε_d	-	pomerná deformácia pri úplnej denzifikácii
ε_{d0}	-	pomerná deformácia na počiatku denzifikácie
$\dot{\varepsilon}$	s ⁻¹	rýchlosť deformácie
η	-	parameter účinnosti

Skratka**Popis***2D*

dvojrozmerný

3D

trojrozmerný

AISI

American Iron and Steel Institute

BCC

Body Centred Cubic

BCCZ

Body Centred Cubic s vertikálnymi prútmi

CAD

Computer Aided Design

GBCC

Body Centred Cubic s rozširujúcimi sa prútmi

SLM

Selective Laser Melting

TPMS

Triply Periodic Minimal Surface

VUT

Vysoké učení technické

10 ZOZNAM OBRÁZKOV A GRAFOV

obr. 2-1	Princíp metódy SLM [2]	13
obr. 2-2	Mikro-prútové štruktúry vyrobené metódou SLM na zariadení Renishaw AM250 [16]	17
obr. 2-3	Topológie 2D štruktúr podľa konektivity: (a) $Z=6$ plne hustá štruktúra zostrojená s trojuholníkovej topológie; (b,c) periodický husté štruktúry $Z=5$ (b), $Z=4$ (c); (d) $Z=4$ štruktúra s nedostatočne hustou topológiou, spadá do kategórie bending-dominated [18].....	18
obr. 2-4	Základné typy mikroprútových štruktúr: (a) BCC; (b) BCCZ; (c) FCC; (d) FCCZ; (e) Kubická; (f) Okto-prutová; (g) Diamant [23]	18
obr. 2-5	Závislosť napätia na pomernej deformácii pre plný a štruktúrovaný materiál ukazujúca množstvo absorbovanej energie pri rovnakej hodnote maximálneho napätia [10]	20
obr. 2-6	Typická závislosť napätia na deformácii pre bunkové štruktúry: (a) húževnatý materiál; (b) krehký materiál [27]	21
obr. 2-7	(a) závislosť napätia na deformácii pri jednoosej kompresii; (b) závislosť parametra účinnosti na deformácii [28].....	22
obr. 2-8	Charakteristické krivky napätia pre štruktúry: (a) bending-dominated; (b) stretching-dominated	23
obr. 2-9	Maximálne hodnoty napätia vzniknuté v štruktúrach s rôznou relatívnou hustotou pri absorbovaní rovnakého množstva energie W sú označené $(\sigma_p)_1$, $(\sigma_p)_2$ a $(\sigma_p)_3$ [10]	24
obr. 2-10	(a) diagram absorpcie energie zostrojený pre plastickú polymetakrylimidovú penu s relatívnou hustotou v intervale $\rho^* \epsilon$ (0,03;0,16) [10]; (b) diagram absorpcie energie pre BCC a TPMS štruktúry vyrobené z ocele 316L metódou SLM [12]; zaťažovacie podmienky sú zhodné pre obidve merania: $\epsilon = 10^{-3} \text{ s}^{-1}$; $T=20^\circ\text{C}$	25
obr. 4-1	(a) Prierez GBCC elementárnej bunky diagonálnou rovinou; (b) Geometria prútu GBCC bunky [24].....	30
obr. 4-2	CAD modely elementárnych buniek (hore) a celých štruktúr (dole); (a) BCC; (b) BCCZ; (c) GBBC.....	30
obr. 4-3	Rozmiestnenie štruktúr na výrobnnej platforme; (a) 316L; (b) AlSi10Mg; (Flow – smer prúdenia ochrannej atmosféry; Rec – pohyb zásobníku s práškom, recouter)	31

obr. 4-4	(a) Schéma pádového zariadenia; (b) Fotografia pádového testu oceleovej vzorky BCC	33
obr. 5-1	Porovnanie štruktúr BCCZ: (a) AlSi ₁₀ Mg; (b) 316L.....	34
obr. 5-2	Rozsah percentuálnej odchýlky ρ'_{RE} pre jednotlivé geometrické konfigurácie: (a) 316L; (b) AlSi ₁₀ Mg	34
obr. 5-3	Fotografie BCC štruktúry pomocou optického mikroskopu: (a) AlSi ₁₀ Mg; (b) 316L. Červené značky reprezentujú smer stavby	35
obr. 5-4	Krivky napätia získané z pádového testu: (a) 316L; (b) AlSi ₁₀ Mg; (vzorka BCC3 z materiálu AlSi ₁₀ Mg - defektná) Pozn.: Farebné označenie štruktúr uvedené na tomto obrázku je zhodné pre všetky ostatné grafické závislosti	36
obr. 5-5	Prehľad intervalov maximálnych hodnôt deformácie a nominálneho napätia pre jednotlivé geometrické konfigurácie: (a) 316L; (b) AlSi ₁₀ Mg	38
obr. 5-6	Snímky vzoriek AlSi ₁₀ Mg z vysokorýchlostnej kamery zobrazujúce ulomenie prútov v rovine u štruktúry BCCZ: (a) diagonálnej; (b) horizontálnej	38
obr. 5-7	Časť krivky napätia pre vzorky z hliníkovej zliatiny do okamihu ulomenia prútov: (a) BCC; (b) GBCC; (c) BCCZ	39
obr. 5-8	Vizuálne porovnanie deformácie štruktúry BCC zo záznamu z vysokorýchlostnej kamery: (a) 316L; (b) AlSi ₁₀ Mg	40
obr. 5-9	Krivky účinnosti pre štruktúry 316L: (a) BCC; (b) GBCC; (c) BCCZ	40
obr. 5-10	Výsledky pádového testu pre vzorku BCC z ocele 316L z rozdielnej výrobnéj série [36]: (a) závislosť napätia na deformácii; (b) krivka účinnosti; (c) prehľad číselných hodnôt	41
obr. 5-11	Úplné krivky účinnosti absorpcie energie pre hliníkové štruktúry GBCC ...	41
obr. 5-12	Čiastočné krivky účinnosti hliníkových vzoriek: (a) BCC; (b) GBCC; (c) BCCZ	42

11 ZOZNAM TABULIEK

tab. 4-1	Chemické zloženie a veľkosť častíc práškových materiálov použitých na výrobu testovacích vzoriek uvedené výrobcom (TLS Technik) 28
tab. 4-2	Procesné parametre pre vzorky vyrobené z materiálu 316L a AlSi ₁₀ Mg 31
tab. 4-3	Prehľad základných rozmerov a hmotností kubických štruktúr (<i>h</i> - rozmer v smere stavby)..... 32
tab. 5-1	Hodnoty relatívnej hustoty zistené z hmotnosti pre všetky testované vzorky (Hustoty plného materiálu: $\rho_{316L}=7950 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$; $\rho_{AlSi10Mg}=2670 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$) 35
tab. 5-2	Prehľad výsledkov z pádového testu: σ_N^{max} - max. hodnota nominálneho napätia; x_{max} - max. deformácia vzorky; t - dĺžka deformácie; v_0 - počiatočná rýchlosť pádovej hlavice; (hodnota σ_{N1}^{max} bola v prípade vzoriek AlSi ₁₀ Mg určená iba po prvý pokles napätia viz. Obr. 5-6) 37
tab. 5-3	Prehľad hodnôt absorbovanej energie W 42
tab. 5-4	Prehľad hodnôt špecifickej absorpcie energie W 43